

Bijlagen bij Turborotonde en turboplein: ontwerp, capaciteit en veiligheid

L.G.H. (Bertus) Fortuijn

- Bijlage A Begrippen, definities en symbolen
- Bijlage B Minirotonde
- Bijlage C Verkeerspsychologische aspecten
- Bijlage D Algemene ontwerpaspecten
- Bijlage E Ontwerp turboblockvarianten
- Bijlage F Capaciteitsmodel turborotondes
- Bijlage G Vergelijking verkeersprestatie turboplein met viertakskruispunt
- Bijlage H Onderzoek voorwegwijzers turboplein
- Bijlage I Ervaringen en belevingen van gebruikers

Inhoudsopgave Bijlagen

Bijlage A. Begrippen, definities en symbolen	209
A.1. Begrippen en definities.....	209
A.2. Sleutelbegrippen rotondes	213
A.3. Lijst van symbolen hoofdstuk 4	214
Bijlage B. Minirotonde	217
B.1. Engelse satellietrotonde: minirotondes in een ring	217
B.2. Minirotonde in Duitsland	218
B.3. Minirotonde Nederland	220
Bijlage C. Verkeerspsychologische aspecten	223
C.1. Risicohomeostasis-concept en gedragsaanpassing.....	223
C.2. Informatieverwerking en wegontwerp	225
C.2.1. Basismodel informatieverwerking gerelateerd aan hiërarchische en cognitieve taakniveaus.....	225
C.2.2. Informatieverwerking op kennisniveau.....	227
C.2.3. Informatieverwerking op regelniveau	227
C.2.4. Informatieverwerking op vaardigheidsniveau.....	228
C.2.5. Relevantie.....	228
Bijlage D. Algemene ontwerpaspecten.....	231
D.1. Plateaus bij verkeerslichten	231
D.2. Rotondeschild	232
D.3. Toetsing snelste doorrijcurve rotondes.....	232
D.4. Uitgangspunten bestreken baan voor bochtverbreding en overrijdbare stroken.	235
D.4.1. Algemeen	235
D.4.2. Breedte rotondebahn.....	236
D.4.3. Overrijdbaar verhoogde stroken (rammelstroken)	238
D.4.4. Breedte draagkrachtige bermstrook in rotondeoksels	240
D.4.5. Bepaling bestreken baan.....	240
D.5. Rammelstrookband.....	242
D.6. Fietsvoorzieningen op rotondes.....	244
D.6.1. Alternatieven fietsvoorzieningen	244
D.6.2. Veiligheid fietsvoorzieningen	245
D.6.3. Fietsvoorzieningen op turborotondes	248
D.6.4. Afdekproblematiek bij dubbelstrooksoversteek.....	248
D.6.5. Conclusie voorrangsregeling fietsoversteken turborotondes	249
Bijlage E. Ontwerp turboblockvarianten.....	251
E.1. Rijbaanbreedte en rijstrookbreedte.....	251
E.2. Ontwerpmethodiek basis turborotonde.....	251

E.2.1. Bepaling rijbaanbreedten basis turborotonde	251
E.2.2. Verloop kantmarkering	252
E.2.3. Ontwerp turboblock	252
E.3. Turboblock spiraalrotonde.....	254
E.4. Turboblock knierotonde	256
E.5. Turboblock sterrotonde	256
E.6. Turboblock rotorrotonde	259
E.6.1. Ontwerpmethode uitgaande van de kant wegverharding	259
E.6.2. Ontwerpmethode uitgaande van de kantmarkering	260
E.7. Ontwerpmethodiek turbopleinen	261
E.7.1. Turboplein met smalle verkeersgeleiders.....	261
E.7.2. Voordelen toepassing variabele rijstrookbreedtes.....	262
E.7.3. Turboplein met brede verkeersgeleiders	263
Bijlage F. Capaciteitsmodel turborotondes.....	267
F.1. Capaciteitsformules	267
F.1.1. Capaciteitsformule van Bovy en Meerstrooksrotondeverkenner	267
F.1.2. Beschouwing effect afwijkingen van M3 model.....	269
F.1.3. Vergelijking hiaatacceptatie-capaciteitsmodellen	271
F.1.4. Invoegverstoring in hiaatacceptatie-modellen.....	273
F.1.5. Opmerkingen bij keuze type hiaatacceptatie-model door FGSV	276
F.2. Uitgevoerde onderzoeken	276
F.3. Hiaatacceptatie-parameters.....	281
F.3.1. Kritisch hiaat	281
F.3.2. Oprijvolgtijden	286
F.4. Schatting parameters capaciteitsmodellen op stroomniveau	288
F.4.1. Schattingsprocedure algemeen.....	288
F.4.2. Parameters enkelstrooksrotonde op stroomniveau	290
F.4.3. Parameters linker toeritstrook hoofdtak turborotonde op stroomniveau.....	295
F.4.4. Linker toeritstrook zijtak turborotonde	302
F.4.5. Effect van verdeling verkeer over twee rotondestroken op de capaciteit van de linker toeritstrook zijtak	314
F.4.6. Capaciteit rechter toeritstroken turborotonde.....	314
F.4.7. Vergelijking toeritcapaciteit met die van concentrische tweestrooksrotondes.....	319
F.4.8. Verschil in resultaat hiaatschatting en capaciteitsschatting	320
Bijlage G. Vergelijking verkeersprestatie turboplein met viertakskruispunt.....	321
G.1. Maatgevende cyclustijd	321
G.1.1. Algemeen	321
G.1.2. Formule maatgevende cyclustijd.....	321
G.2. Verkeersprestatie viertakskruispunt	323
G.2.1. Keuze referentie viertakskruispunt.....	323
G.2.2. Mogelijke combinaties van maatgevende conflictbelastingen op een viertakskruispunt	324
G.2.3. Optimale fasevolgorde op een viertakskruispunt	324
G.3. Verkeersprestatie turboplein.....	327
G.3.1. Configuratie turboplein	327
G.3.2. Verkeersregeling op een verkeersplein	327
G.3.3. Mogelijke combinaties van maatgevende conflictbelastingen op de deelkruispunten van een verkeersplein.....	329

G.3.4. Capaciteitsverlies op een turboplein	330
G.3.5. Maatgevende cyclustijd turboplein	333
G.4. Grafieken verkeersprestatie turboplein en viertakskruispunt	334
Bijlage H. Onderzoek voorwegwijzers turboplein	343
H.1. Achtergrond	343
H.2. Opzet van het onderzoek	344
H.3. Onderzochte varianten	348
H.4. Resultaten	351
H.5. Afsluitende opmerkingen	356
Bijlage I. Ervaringen en belevingen van gebruikers	359
I.1. Enquêteformulier Coldenhove	359
I.2. Tabellen enquête Coldenhove	360
I.3. Enqueteformulier geregeld turboplein Doenkadeplein	361

Bijlage A. Begrippen, definities en symbolen

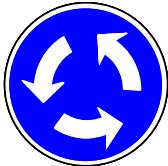
A.1. Begrippen en definities

Aanvoertak [*]	Deel van een toeleidende weg die aansluit op een rotonde (aansluitende tak) waarop het verkeer de rotonde nadert.
Aansluitboog [*] :	Gebogen verbindingslijn tussen de kanten van de verhardingen van twee niet in elkaars verlengde liggende verkeersbanen ter plaatse van een kruispunt, aansluiting of rotonde.
Afvoertak [*] :	Deel van een toeleidende weg die aansluit op een rotonde (aansluitende tak) waarop het verkeer van de rotonde af rijdt.
Beslissingspunt:	Punt waar de weggebruiker op de verkregen informatie van bewegwijzering gereageerd moet hebben (door voor te sorteren of af te slaan) voor het volgen van de gewenste richting.
Binnenstraal [*] :	Afstand van het middelpunt van een boogsegment tot aan de binnenkant van de rotondebahn, exclusief de overrijdbaar verhoogde strook.
Buitenstraal [*] :	Afstand van het middelpunt van een boogsegment tot aan de buitenkant van de rotondebahn, exclusief overrijdbaar verhoogde stroken in de rotondeoksels en exclusief eventuele vrijliggende fietspaden.
Conflictpunt:	Punt waar verkeersstromen samenvoegen of elkaar kruisen (ook als conflictvlak aangeduid).
Conflictgroep:	Groep van verkeersstromen die, omdat ze op één en dezelfde plaats (conflictvlak) elkaar kruisen, niet tegelijkertijd groen licht kunnen krijgen.
Capaciteit:	Maximum aantal voertuigen dat een punt op een weg of een rijstrook gedurende een bepaalde periode onder de heersende weg- en verkeersomstandigheden kan passeren.
Cyclustijd:	Tijdsduur waarin de fasencycli, inclusief faseoverslagen, van alle richtingen van een verkeerslichtenregeling zijn doorlopen.
Expositiemaat:	Noemer in het quotiënt van het begrip risico. Voor de expositiemaat zijn diverse mogelijkheden, zoals bijvoorbeeld het aantal inwoners van Nederland en voertuigkilometers. Voor het veiligheidsrisico van

^{*} De begrippen met een sterretje zijn weergegeven in Figuur A.2-1 Rotondeonderdelen

	kruispunten wordt het totaal aantal voertuigen dat in een etmaal het kruispunt gebruikt, gehanteerd.
Fasecyclus:	Opeenvolging van een groen, geel en rood licht per verkeerslantaarn (of per signaalgroep).
Gevaarzetting:	Blootstelling aan gevaar, uitgedrukt in het niveau van (letsel)ongevallen door zowel het (hogere) risico als de (hogere) verkeersprestatie, die in principe niet toevallig maar voor een punt structureel van aard is.
Hiaat:	Strikte definitie: de tijd tussen het passeren van de achterkant van de ene auto en de voorkant van de volgende auto. In analytische modellen ¹ (ook in dit proefschrift) wordt het begrip hiaat als synoniem van de volgtijd gehanteerd. Het begrip hiaat wordt in plaats van volgtijd gebruikt, als het wordt beschouwd vanuit het gezichtspunt van de conflicterende stroom.
Kritisch hiaat:	Minimum tijdsinterval in de hoofdstroom dat de bestuurder die voorrang moet verlenen, bereid is te accepteren om de hoofdstroom te kruisen of om erin in te voegen (rekengrootheid).
Kruispunt:	Verzamelbegrip voor alle gelijkvloerse uitwisselingspunten, rotondes inbegrepen. Voor de duidelijkheid worden rotondes ook wel afzonderlijk genoemd in onderscheid van een drie- of viersprong.
Middeneiland*:	Verhoogde, niet overrijdbaar middendeel van de rotonde.
Middengeleider*:	Verhoogde, niet overrijdbare voorziening in het midden van de toeleidende weg ter hoogte van de aansluiting op de rotonde, of kruisende weg.
Minimum volgtijd:	Tijdsinterval tussen voertuigen die in de hoofdstroom elkaar geclusterd volgen (rekengrootheid, afhankelijk van wat gerekend wordt tot geclusterd rijden).
Nulpunt:	Punt waar de weg zich verbreedt ter inleiding van de voorsorteerstroken.
Ongevallendichtheid:	Jaarlijks aantal slachtofferongevallen (ongevallen met doden en gewonden) per kilometer weglengte. Deze maat hangt sterk samen met het absolute aantal verkeersslachtoffers.
Ongevallenfrequentie:	Aantal slachtofferongevallen (ongevallen met doden en gewonden) per miljoen afgelegde voertuigkilometers. Deze maat hangt sterk samen met het risico op een letselongeval voor de verkeersdeelnemer.
Oprijvolgtijd:	Tijdsafstand tussen voertuigen die vanaf de aansluitende tak achter elkaar – gebruikmakend van een groter hiaat in de hoofdstroom – het conflictvlak oprijden.

¹ De reden hiervoor is de relatie tussen intensiteit en hiaatverdeling zo eenvoudig mogelijk te houden.

Ontruimingstijd:	Tijdsduur die nodig is voor het ontruimen van een conflictvlak. De volgorde waarin de richtingen elkaar opvolgen is bepalend voor de ontruimingstijd voor een bepaalde conflictgroep.
Rijcurve:	Hart van de baan die een voertuig volgt bij het passeren van een rotonde.
Risico:	Als het om verkeersslachtoffers (mensen) gaat: het quotiënt van het aantal slachtoffers en de expositiemaat. Als het gaat om het risico dat een kruispunt of rotonde oplevert: het quotiënt van het aantal (slachtoffer)ongevallen en de expositiemaat.
Rotonde:	Verkeersplein² waarop het verkeer voorrang heeft en waarop wegen radiaal aansluiten (CROW, 1998 aangepast en CROW, 2002a). Het begrip rotonde kan ook gedefinieerd worden zonder gebruikmaking van het begrip verkeersplein: gelijkvloers kruispunt waar het verkeer in een rondgaande beweging wordt afgewikkeld, waarop het verkeer voorrang heeft en waarop wegen radiaal aansluiten.³
	 RVV-bord D1
Rotondecapaciteit:	Som van de toerit-intensiteiten op het moment dat op één van de toeritten de capaciteit wordt bereikt.
Rijcurve:	As van de baan die een voertuig bestrijkt bij het passeren van een rotonde.
RVV:	Reglement verkeersregels in verkeerstekens 1990.
Signaalgroep:	Groep verkeerslantaarns die gelijktijdig dezelfde fasecyclus doorlopen.

² In CROW-publicatie 127 (CROW, 1998) staat hier het woord 'plein'. Beter is hier het begrip 'verkeersplein' te gebruiken zoals in CROW 2002a, omdat anders de essentiële bepaling 'waar het verkeer in een rondgaande beweging wordt afgewikkeld' ontbreekt. Zo luidde ook het voorstel op een evaluatiebijeenkomst die in december 1991 bij het CROW werd gehouden (Van Arem en Traag, 1992).

³ Hoewel het RVV (1990) sinds 15 december 1999 het begrip rotonde gebruikt in zowel de artikelen 47 en 48 alsook in de toelichting op verkeersbord D1, wordt het begrip rotonde in het RVV zelf niet gedefinieerd. Het uitgangspunt daarbij is (kennelijk), dat de toelichting op het verkeersbord D1 (Rotonde: verplichte rijrichting) voor de verkeersdeelnemer voldoende is. Dit betekent dat de definitie van het begrip rotonde zoals dat in verkeerskundige publicaties wordt gebruikt strikter is dan in juridische zin. In feite zijn in juridische zin de begrippen verkeersplein en rotonde bij de wijziging van het RVV in 1999 voor de verkeersdeelnemer als equivalent beschouwd. Dit is vanuit juridisch oogpunt begrijpelijk, omdat de voorrang cf. de conventie van Wenen afzonderlijk geregeld moet worden met RVV-bord B6 (Verleen voorrang aan bestuurders op de kruisende weg).

RVV-artikel 47: Het is bestuurders van een motorvoertuig en bromfietzers die de rijbaan volgen toegestaan vlak voor of op rotondes anders dan aan de rechterzijde van de rijbaan te rijden.

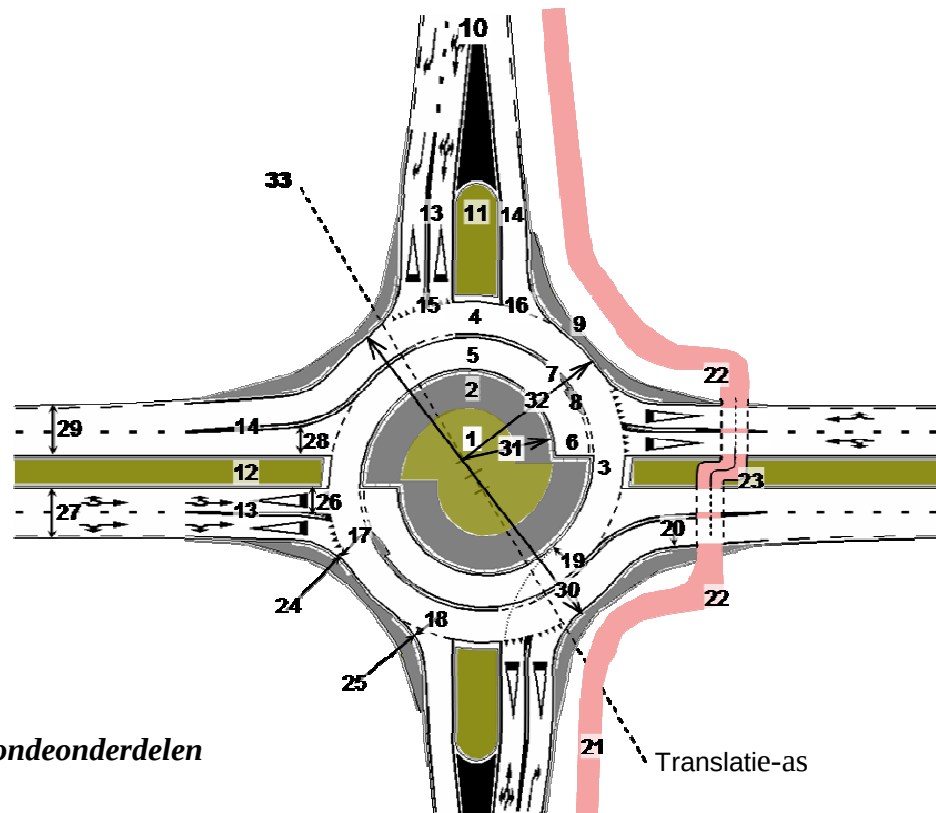
RVV-artikel 48: Het is bestuurders toegestaan vlak voor of op rotondes rechts in te halen.

RVV-bord D1: Rotonde: verplichte rijrichting (na 15 december 1999);
Verkeersplein: verplichte rijrichting (vóór 15 december 1999).

SLO:	Aantal slachtofferongevallen, d.w.z. ongevallen met doden en gewonden.
Strookwisselwegwijzer:	Een voorwegwijzer waarop de noodzaak tot strookwisselen in relatie tot de te kiezen afslagrichting wordt aangegeven.
Tangentpunt*:	Punt waar de ene boogstraal overgaat in de andere boogstraal of rechtstand.
Translatie-as*:	As waarlangs de middelpunten verspringen om met behulp van cirkels spiraalvormige bogen te creëren. Afhankelijk van de 'snelheid' van de spiraal varieert het aantal translatie-assen en de wijze waarop de middelpunten verspringen.
Turboblock:	Samenstel van translatie-assen met de cirkelbogen voor de rotondestroken. Deze term is ontleend aan de geautomatiseerde tekentechniek.
Turboprincipe:	Kenmerken die de turborotonde en het turboplein gemeenschappelijk hebben in onderscheid van andere rotondes en verkeerspleinen: - rijstroken op verkeersplein of zodanig, dat een nieuwe rijstrook altijd tegenover een aansluitak begint; - radiaal aansluitende takken met verschillende rijstroken; - overrijdbaar verhoogde rijbaanscheidingen op het plein of de rotonde tussen rijstroken in verschillende richtingen ter voorkoming van het met hoge snelheid afsnijden van de uitbuiging.
Verkeersplein:	Gelijkvloers kruispunt waar het verkeer in een rondgaande beweging wordt afgewikkeld (CROW 1998). Oorspronkelijk werd dit begrip gebruikt in het Reglement verkeersregels en verkeerstekens 1990 (RVV1990) in de artikelen 47 en 48 en in de toelichting op verkeersbord D1: verkeersplein verplichte rijrichting. Met ingang van 15 december 1999 is het woord 'verkeersplein' in RVV (1990) vervangen door 'rotonde'.
Verkeerstaak:	Geheel van handelingen (mentaal en fysiek) die leiden tot verkeersmanoeuvres. Als in dit proefschrift de subjectief ervaren kant daarvan wordt bedoeld, wordt het woord rijtaak gebruikt.
Volgtijd:	Tijd tussen het passeren van de achterkant van de ene auto en de achterkant van de volgende auto.
Voorwegwijzer:	Op enige afstand voor het nulpunt (of als dat er niet is beslissingspunt) geplaatste wegwijzer die informatie geeft over de keuzemogelijkheden.
Wegcategorie:	Classificatie van een weg naar verkeersfunctie binnen het totale netwerk van wegen, die als zodanig voor de weggebruiker goed herkenbaar zijn.

A.2. Sleutelbegrippen rotondes

In onderstaande figuur zijn de begrippen die voor het beschrijven van rotondes van belang zijn, weergegeven.



Figuur A.2-1 Rotondeonderdelen

nr. Onderdeel

- 1 Middeneiland
- 2 Overrijdbaar verhoogde strook (rammelstrook) in rotondecentrum
- 3 Rotonderijbaan
- 4 Buitenste rotondestrook
- 5 Binnenste rotondestrook
- 6 Begin binnenste rotondestrook
- 7 Overrijdbaar verhoogde rijstrookscheiding
- 8 Overrijdbaar verhoogde druppel (overrijdbaar verhoogd puntstuk)
- 9 Overrijdbaar verhoogde strook (rammelstrook) in aansluitoksel
- 10 Aansluitende tak
- 11 Middengeleider in aansluitende tak
- 12 Baanscheiding in aansluitende tak
- 13 Aanvoertak
- 14 Afvoertak
- 15 Rotonde-toerit
- 16 Rotonde-afrit

nr. Onderdeel

- 17 Aansluitboog toerit
- 18 Aansluitboog afrit
- 19 Tangentpunt inrijboog – rotondeboog
- 20 Tangentpunt aansluitboog – afvoertak
- 21 In twee richtingen bereden (brom)fietspad
- 22 Uitbuiging in fietspad
- 23 Fietschicane

Ontwerpgrootheid

- 24 Straal aansluitboog toerit
- 25 Straal aansluitboog afrit
- 26 Breedte toerit(strook)
- 27 Breedte aanvoertak
- 28 Breedte afrit(strook)
- 29 Breedte afvoertak
- 30 (Grootste) rotondediameter
- 31 Rotondebinnenstraal
- 32 Rotondebuitenstraal
- 33 Translatie-as

A.3. Lijst van symbolen hoofdstuk 4

- α : invloed van het afslaand verkeer op de capaciteit van de toerit in de notatie van Bovy.
- β : invloed circulerend verkeer op de toeritcapaciteit, in de notatie van Bovy.
- δ : algemene correctiefactor voor het verschil tussen de parameters verkregen uit hiaatmetingen en verzadigde stroommetingen.
- η : parameter die in het onderzoek is gebruikt als vervanger van de minimum volgtijd in dat deel van de capaciteitsformule dat de invloed van de verdeling van het verkeer over de twee rotondestroken beschrijft (in SG) [s/pae].
- λ_{Rj} : intensiteit van de hoofdstroom (rotonde-intensiteit) op strook j , gecorrigeerd voor de hoeveelheid geclusterd verkeer voor zover die afwijkt van de ‘Tannerverdeling’ [pae/s]
 = flow rate (Cowan, 1975)
 = decay constant (Troutbeck, 1994)
 = intensity of the exponential part of a distribution (Hagring, 1998)
 = arrival rate for free vehicles (Hoogendoorn, 2005)
 = clustering-gecorrigeerde rotonde-intensiteit (in deze studie)
- $$\lambda_{Rj} = \frac{\varphi q_{Rj}}{1 - q_{Rj} t_M} = \rho \cdot q_{Rj} \quad [\text{pae/s}].$$
- Λ_{RSi} : $\Lambda_{RSi} = 3600 \cdot \sum \lambda_{RSi} = 3600 \cdot \sum (\lambda_{Ri} + \lambda_{RUSi})$, waarin RI de index is voor de binnenste rotondestrook en RUS de index voor de buitenste rotondestrook (inclusief een bijtelling voor het schijnconflict van het afslaand verkeer naar de bijbehorende afvoerstrook S , voor zover van toepassing voor de betreffende toeritstrook i) [pae/h].
- ρ : de clusteringconstante, die aangeeft in hoeverre het aandeel geclusterd verkeer afwijkt van de ‘Tannerverdeling’.
 Voor $\rho=1$ is de hiaatverdeling in deze publicatie gedefinieerd als de ‘Tannerverdeling’ ($\varphi = 1 - q_R \cdot t_M$). Als $\rho < 1$ is, is de clustervorming bovenproportioneel, wat gunstig is voor de toeritcapaciteit. Indien $\rho > 1$ is, wijkt de verdeling (in ongunstige zin) af van de ‘Tannerverdeling’, zodat de rotonde-intensiteit fictief wordt verhoogd, omdat de ‘vrij rijdende voertuigen’ in werkelijkheid niet exponentieel verdeeld zijn.
- φ_j : proportie vrije voertuigen op rotondestrook j .
- ξ : vermenigvuldigingsfactor voor de oprijvolgtijd verkregen uit hiaatwaarnemingen voor toepassing in een capaciteitsmodel geschat op capaciteitwaarnemingen.
 Opmerking: ξ wordt alleen gebruikt als $\delta = 1$ en omgekeerd.
- ψ : vermenigvuldigingsfactor voor de kritische hiaten verkregen uit hiaatwaarnemingen voor toepassing in een capaciteitsmodel.
- a : invloed van het afslaand verkeer op de capaciteit van de toerit in een vereenvoudigde notatie van het model van Bovy

$$a = \frac{8}{9} \frac{\alpha}{\gamma}.$$
- b : invloed circulerend verkeer op de toeritcapaciteit; ten opzichte van de oorspronkelijke formule van Bovy geldt $b = \frac{8}{9} \frac{\beta}{\gamma}.$

- d : invloed van het afslaand verkeer als onderdeel van de ‘schijnintensiteit’ op de rotonde; in het model van Bovy geldt: $d = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{a}{b}$.
- d_K : invloed van het afslaand verkeer afkomstig van de tak die een kwart cirkelsegment voor de toerit ligt.
- d_H : invloed van het afslaand verkeer Q_{S1H} dat afkomstig is van het rotundesegment gelegen voor de voorliggende aansluitak (een half cirkelsegment voor de toerit).
- d_{HR} : invloed van het afslaand verkeer Q_{S1H} afhankelijk van de relatieve omvang van het rotondeverkeer in die periode in de uitdrukking: $d_{HR} \cdot \frac{Q_{RUK} \cdot Q_{S1H}}{Q_{RUK} + Q_{S1H}}$.
- C_{0i} : capaciteit van de toeritstrook i zonder verkeer op de rotonde [pae/h].
- C_{Ei} : capaciteit van de toeritstrook i in personenauto-equivalenten per uur [pae/h].
- $\hat{C}_{Eip}$: geschatte capaciteit van toeritstrook i , op basis van de waargenomen rotonde-intensiteiten Q_{Rj} (en Q_{Rj}) in periode p in een situatie met een wachtrij op de toerit, ingevuld in een capaciteitsformule [pae/h].
- g_v : pae-waarde voor voertuigsoort v ; voor $v = 1$ is per definitie $g_1 = 1$
- h : hiaatgrootte in deze studie gelijk aan de volgtijd t (inclusief voertuig). Het is de tijd die verstrijkt tussen het passeren van de achterkant van het ene voertuig en dat van het volgende voertuig [s/vtg].
- j, k, l : indices voor de ligging van de rotondestrook, waarbij het steeds om dezelfde stroken gaat, maar verschillende indices gebruikt worden vanwege de verschillende wiskundige operatoren Σ en Π in één formule.
- Q_E : toerit-intensiteit bij filevorming omgerekend naar personenauto-equivalenten per uur [pae/h].
- $Q_{E v,p}$: intensiteit van voertuigcategorie v , gemeten op de toerit in periode p bij filevorming [vtg_v/h].
- $Q_{Rj,v}$: intensiteit van voertuigsoort v op rotundesegment j [vtg_v/h].
- Q_{Rj} : rotonde-intensiteit op rotondestrook j per uur omgerekend naar personenauto-equivalenten [pae/h].
- Q_R : rotonde-intensiteit op alle rotondestroken samen per uur [pae/h].
- q_r : rotonde-intensiteit in personenauto-equivalenten per seconde⁴ [pae/s].
- Q_{RS} : virtuele rotonde-intensiteit inclusief het gewogen schijnconflict van het afslaand verkeer naar de aanliggende rotondetak [pae/h].
- Q_{RI} : rotonde-intensiteit op de binnenste rotondestrook [pae/h].
- Q_{RU} : intensiteit op de buitenste rotondestrook [pae/h].
- Q_{RUS} : virtuele rotonde-intensiteit inclusief schijnconflict op de buitenste rotondestrook, in personenauto-equivalenten per uur [pae/h].
- Q_{RSv} : virtuele rotonde-intensiteit van voertuigsoort v , inclusief schijnconflict op de rotonde [vtg_v/h].
- Q^*_S : afrit-intensiteit per uur, ongespecificeerd naar voertuigen [vtg/h].
- Q_{Sv} : intensiteit van voertuigsoort v op de afrit naast de toerit [vtg_v/h].

⁴ Voor alle symbolen C en Q geldt, dat de kleine letter duidt op de hoeveelheid per seconde en de hoofdletter op de hoeveelheid per uur.

- Q_{SIK} : intensiteit van afslaand verkeer afkomstig van de tak die een kwart segment voor de toerit ligt [pae/h].
- Q_{SIH} : intensiteit van afslaand verkeer afkomstig van het rotondesegment gelegen voor de voorliggende aansluitak (een half cirkelsegment voor de toerit) [pae/h].
- Q_{RUK} : intensiteit van rotondeverkeer op de buitenste rotondestrook afkomstig van de tak die een kwart segment voor de toerit ligt [pae/h].
- SG : strookgebruikfactor (vergelijking 4.36).
- t_B : gemiddelde volgtijd van het geclusterde rotondeverkeer [s/pae].
- t_C : kritisch hiaat, gerekend van achterkant tot achterkant voertuig [s/pae].
- $t_{C i, j}$: het kritisch hiaat voor toeritstrook i in rotondestrook j [s/pae].
- $t_{F i}$: oprijvolgtijd van verkeer vanaf toeritstrook i dat van hetzelfde hiaat op de rotonde gebruik maakt [s/pae].
- t_M : minimum volgtijd rotondeverkeer [s/pae].
- v : voertuigsoort op de toerit waarin $v = 1$ staat voor de personenauto, $v = 2$ voor de ongelede vrachtauto en $v = 3$ voor de gelede vrachtauto.
- w : voertuigsoort op de rotonde, indien de voertuigsoorten op de toerit en de rotonde onderscheiden worden (het onderscheid tussen v en w is niet gebruikt in het kalibratieproces).
- z_i : invoegverstoringsfactor, een correctiefactor voor de toeritcapaciteit als gevolg van invoegverstoring; z_1 voor de linker toeritstrook en z_2 voor de rechter (of enige) toeritstrook.

Bijlage B. Minirotonde

B.1. Engelse satellietrotonde: minirotondes in een ring

In paragraaf 1.1.2 is bij de behandeling van de ontstaansgeschiedenis van de moderne rotonde in Engeland ook de mini-roundabout, bedacht door Frank Blackmore (1970), als typisch Engelse variant van de moderne rotonde aan de orde gekomen. Het Engelse begrip ‘mini-roundabout’ heeft geen betrekking op de buitendiameter van de rotonde maar op de diameter en vorm van het middeneiland (zie Figuur 1.1-7). Een bijzondere toepassing van minirotondes vindt plaats op oude verkeerspleinen met een groot aantal takken. In feite gaat het dan om een ringweg met een aantal satellietrotondes. In de Engelse rotonderichtlijn wordt dit als vierde toepassingsmogelijkheid genoemd van de *Double Roundabout with Short Central Link* (DTF, 2007, p.3/3). Deze oplossing is ook bekend onder de naam ‘magic roundabout’. Een beschrijving van de ‘Magic Roundabout’ te Swindon (Figuur B.1-1 is bijvoorbeeld op Wikipedia.org te vinden).

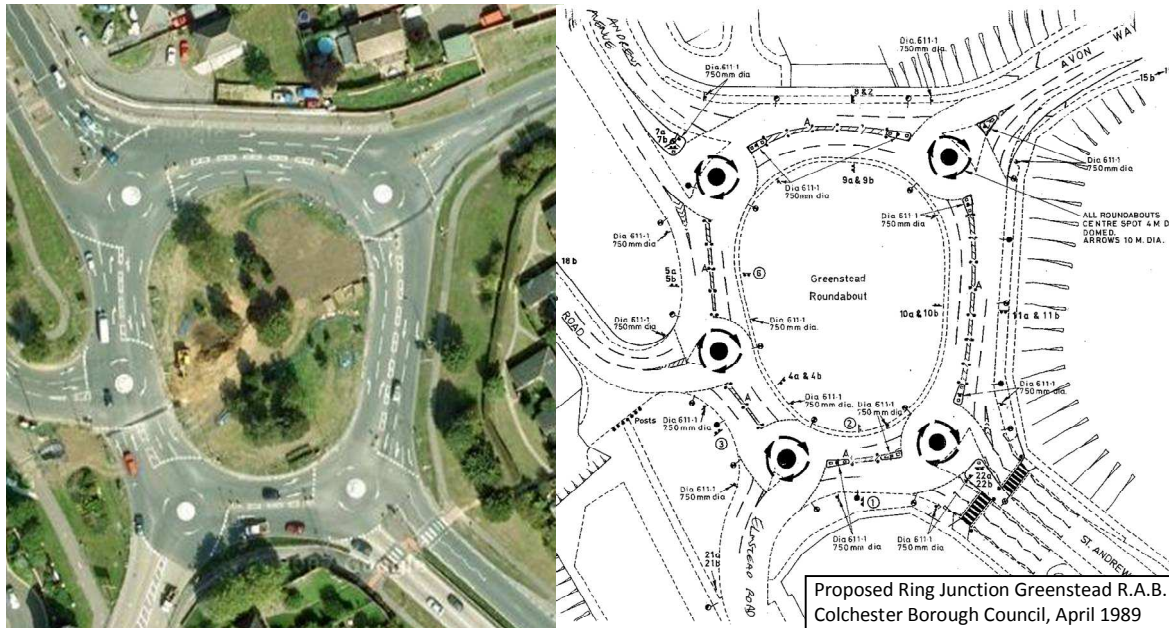


Figuur B.1-1 *The Magic Roundabout te Swindon*

Toelichting: in feite zijn dit vijf minirotondes met rijstroken ter breedte van twee stroken, die met elkaar verbonden zijn door korte verbindingswegen (die in een cirkel liggen, maar in twee richtingen bereden worden). Op de verbindingscirkel zijn de afvoertakken van de minirotondes twee stroken breed, terwijl de toevoertakken drie of vier stroken breed zijn. Rijstrookmarkering is alleen aangebracht op de takken met meer dan twee rijstroken. Voor toepassing is de Engelse discipline onmisbaar, omdat anders de kans op blokkade erg groot is, doordat de cirkelvormige verbindingswegen zo kort zijn.

Een ander voorbeeld is de *satellite roundabout* in Colchester (Figuur B.1-2). Deze ring van mini-roundabouts is ontworpen om per dag 44.000 voertuigen te kunnen verwerken. In de periode 1984-1988 vonden er 10 slachtofferongevallen plaats, waarvan 8 met lichtgewonde en

2 met zwaargewonde slachtoffers⁵. Dit is vergelijkbaar met het gemiddeld aantal slachtofferongevallen op vijf turborotondes in vijf jaar.



Figuur B.1-2 *Satellite roundabout Colchester (Greenstead Roundabout, 1989)*

Opgemerkt zij, dat de zuidoost tak van deze ring van rotondes voorzien is van een voetgangersoversteekplaats (met een chicane in de middenberm), die met verkeerslichten wordt geregeld⁶.

B.2. Minirotonde in Duitsland

In tegenstelling tot Engeland gaat het in Duitsland bij Mini-Kreisverkehrsplätzen wel om rotondes met een kleine buitendiameter. Brilon (2011b) meldt dat sinds 1995 in Nordrhein-Westfalen op 13 plaatsen zeer succesvolle proefnemingen met minirotondes zijn gedaan. Ze kunnen 17.000 vtg/dag verwerken met een gunstige ongevallenreductie. Uit de afnamecijfers is af te leiden dat de ongevallen met letsel sterker zijn afgenomen dan die met uitsluitend materiële schade (Tabel B.2.1).

⁵ Bron: brief van Andrew Budd, Transportation Officer van Colchester Borough Council, d.d. 11 januari 1999, die de zending van een aantal tekeningen begeleidde.

⁶ De tekst van de brief van Budd bevat ook andere interessante informatie:

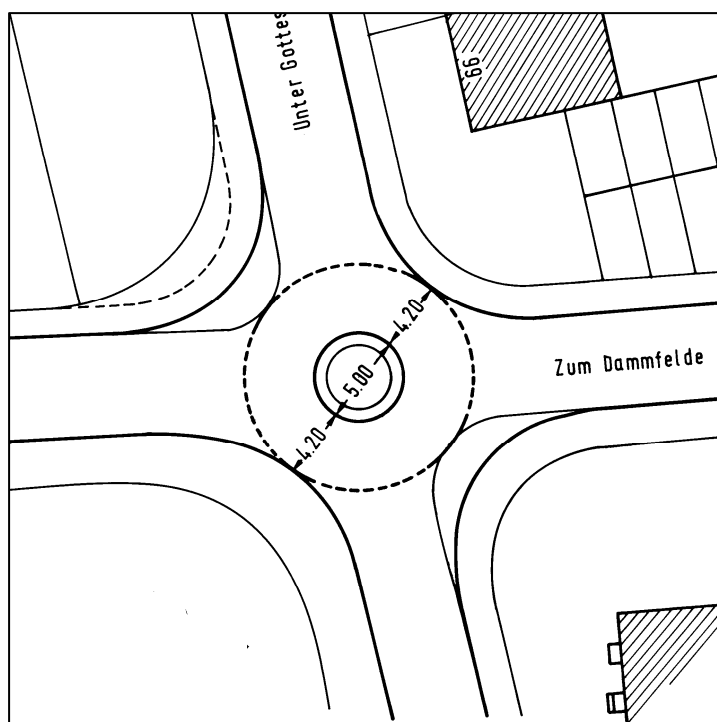
“In reply to your questions about the roundabouts you had seen in Colchester, I enclose some plans. It should be understood that they are designed in accordance with our national standards where possible, to codes published in the early 1980’s. The UK approach tended to favour slow entry and fast exit, and with our rule that you give way to circulating traffic on the roundabout, the designs successfully dealt with large volumes of traffic with comparative safety. Unfortunately these schemes have left us with a large number of roundabouts in our towns which are very unfriendly to pedestrians, and rather dangerous to cyclists. Looking to the future, we expect that many roundabouts will have traffic signals installed, to deal with the expected increase in motor traffic. This will make it a little better for those on foot and bike.”

Tabel B.2.1 Veiligheidseffect aanleg minirotondes

Minirotondes in Noordrijn-Westfalen	Voor	Na	Eenheid:
Ongevallenratio (accident rate AR)	0,79	0,56	ongevallen / mln vtg
Ongevallenkostenratio (accident cost rate ACR)	9,47	3,91	€ / 1000 vtg

**Figuur B.2-1 Minirotondes in Karlsruhe en Hamburg (bron: Brilon 2011a)**

Een minirotonde kan veelal binnen de grenzen van een bestaand kruispunt worden gerealiseerd. Voor de maatvoering wordt verwezen naar NRW (1999).

**Figuur B.2-2 Ontwerp voor een minirotonde in Keulen (NRW, 1999)**

B.3. Minirotonde Nederland

Niet alleen in de Duitse literatuur wordt aandacht besteed aan de minirotonde, maar ook in andere Europese landen⁷. In tegenstelling tot Duitsland worden in Nederland minirotondes niet gepromoot. Minirotondes worden in CROW-publicatie 126 niet behandeld. Hiervoor zijn drie redenen aan te voeren:

- in Nederland werkten ‘witte stiprotondes’ niet goed: in Maastricht rijden auto’s al vanaf de aanleg voor het station gewoon over de witte stip heen (zie Figuur B.3-1);
- in Nederland is voor kruispunten van erftoegangswegen een alternatief naar voren gekomen: de punaise (zie Figuur B.3-2);
- de richtlijnen voor de Nederlandse rotonde kenmerken zich door de systematische aandacht voor voldoende uitbuiging van de doorrijcurve.



Figuur B.3-1 Witte-stiprotonde te Maastricht (foto Van Minnen) met suggestie voor aanpassing tot minirotonde



Figuur B.3-2 Punaise in Scherpenzeel

⁷ Zie bijvoorbeeld http://nmfv.dk/PDF-filer/Vejnormalgrupper/Seminar_stockholm_juli_2011/ onder Denemarken en Finland.

Duidelijk is, dat de Nederlandse verkeerspunaise op het eerste gezicht veel lijkt op een minirotonde. De snelheidsreductie wordt op een punaise uitsluitend verkregen door de verhoogde, ronde plateauvorm. Het lijkt de moeite waard onderzoek te doen naar de vraag of de snelheidsreductie van de Duitse minirotonde via uitbuiging een hogere veiligheidswinst oplevert dan verticale deflexie door de Nederlandse verkeerspunaise. Ongetwijfeld zal de minirotonde een hogere verkeerscapaciteit hebben (omdat die toch de kenmerken van een rotonde heeft).

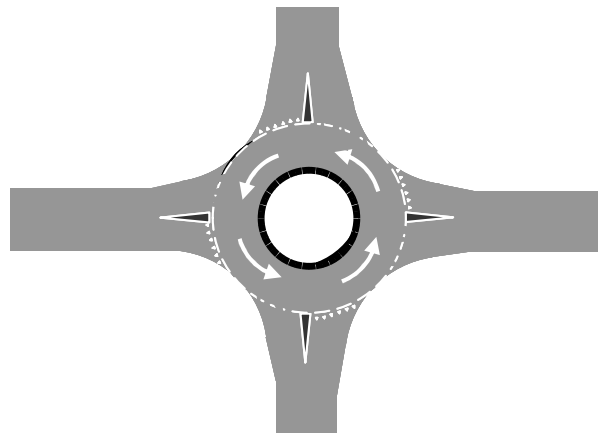
Het zwakke punt van minirotondes die in Nederland zijn gerealiseerd, is de kleine uitbuiging van de rijcurve, waardoor de doorrij snelheid hoog kan zijn. De foto van Figuur B.3-3 is ontleend aan een artikel over onveilige rotondes in Zeeland (Bosch e.a., 2010). Het middeneiland is weliswaar niet overrijdbaar, maar de diameter is klein met een overduidelijk te kleine uitbuiging van de rijcurve. De auteurs stelden voor om 60 km/h plateaus aan te brengen op de naderingsrichtingen.



Figuur B.3-3 *Semi-minirotonde Poortvliet*

Het probleem van een te kleine uitbuiging van de rijlijn kan echter aanzienlijk worden verminderd door twee maatregelen:

- het middeneiland duidelijk (weliswaar overrijdbaar) verhoogd uitvoeren;
- de diameter ervan vergroten, zodat een relatief smalle rijloper overblijft.



Figuur B.3-4 *Schets minirotonde voor Nederland*

Laatst genoemde eis houdt in, dat het verhoogd overrijdbare middeneiland groter moet worden (zodat personenauto's voldoende afremmen) dan bijvoorbeeld in Engeland gebruikelijk is en ontwerpers in het verlengde daarvan in Nederland hebben toegepast. Het

gevolg van een groter overrijdbaar middeneiland zal zijn, dat alle auto's met een grotere draaicirkel dan een personenauto met hun achterwielen over dat eiland zullen rijden. De uitdaging is het middeneiland zo vorm te geven dat het volstrekt niet uitnodigt tot het berijden ervan, terwijl het wel goed overrijdbaar blijft voor grote voertuigen. De hoogte van de toe te passen overrijdbare binnencirkel is sterk afhankelijk van de mate van gedisciplineerdheid van de bestuurders van personenauto's. Wellicht dat toepassing van een rammelstrookband (die over 10 cm met een knik 7 cm rijst, zie bijlage D.5) met reflectoren perspectieven biedt.

Aangezien de minirotonde geen verticale elementen op ooghoogte bevat, is deze minder geschikt voor toepassing buiten de bebouwde kom, tenzij het mogelijk is met leds de aanwezigheid van het middeneiland duurzaam overduidelijk kenbaar te maken.

Omdat het fietsverkeer gebruik maakt van de rijweg, is het uit veiligheidsoverwegingen niet gewenst minirotondes toe te passen bij etmaalintensiteiten hoger dan 5000 mvt/etm, tenzij – in feite in strijd met het concept achter de minirotonde (toepassing op erftoegangswegen) – het (brom)fietsverkeer zich toch via fietspaden afwikkelt.

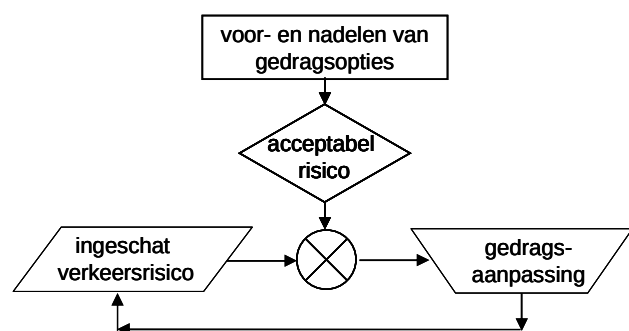
Bijlage C. Verkeerspsychologische aspecten

De rijtaak is complex van aard. In de psychologie wordt de rijtaak dan ook vanuit verschillende invalshoeken benaderd. In deze studie beperkt de beschrijving van de bijdrage vanuit de verkeerspsychologie zich tot twee benaderingswijzen, die op een betrekkelijk eenvoudige wijze de invloed van het ontwerp op gedrag en taakbelasting van de verkeersdeelnemer inzichtelijk maken.

C.1. Risicohomeostasis-concept en gedragsaanpassing

Het risicohomeostasis-concept gaat ervan uit, dat verkeersdeelnemers in de afweging van voor- en nadelen (in termen van gemak en tijdwinst c.q. -verlies) het risico voortdurend constant proberen te houden. Het resultaat van deze afweging (i.c. het geaccepteerde risico) is afhankelijk van een groot aantal factoren, zoals de competentie van de verkeersdeelnemer, motivatie, tijdsdruk, maar ook de inschatting van het risico door de verkeersdeelnemer (Fuller, 2002, p.55).

Figuur C.1-1 Vereenvoudigd diagram van sleutelementen in het risicohomeostasis-concept



Inzicht in de inschatting van het risico door de verkeersdeelnemer en de daarmee samenhangende gedragsaanpassing is voor de verkeersingenieur van belang om veiligheidswinst te kunnen boeken. De inschatting van het risico door de verkeersdeelnemer houdt namelijk geen gelijke tred met het echte risico. In feite is er dus geen sprake van een zelfregulering van het risico⁸ door de verkeersdeelnemer, maar van een gedragsaanpassing (Fuller, a.w. p.56).

Bekend is bijvoorbeeld, dat een smallere weg door de weggebruiker als meer risicovol wordt ingeschat en daarom zijn snelheid naar beneden toe aanpast. Toch is die aanpassing bij smalle

⁸ Tegen het concept van de risicohomeostase als theorie (uitgewerkt door De Wilde) zijn ook bezwaren ingebracht op het niveau van de assumpties die noodzakelijk zijn om het als een consistent theoretisch model te kunnen hanteren. Michon (1989, blz. 223) noemt als twee noodzakelijke assumpties:

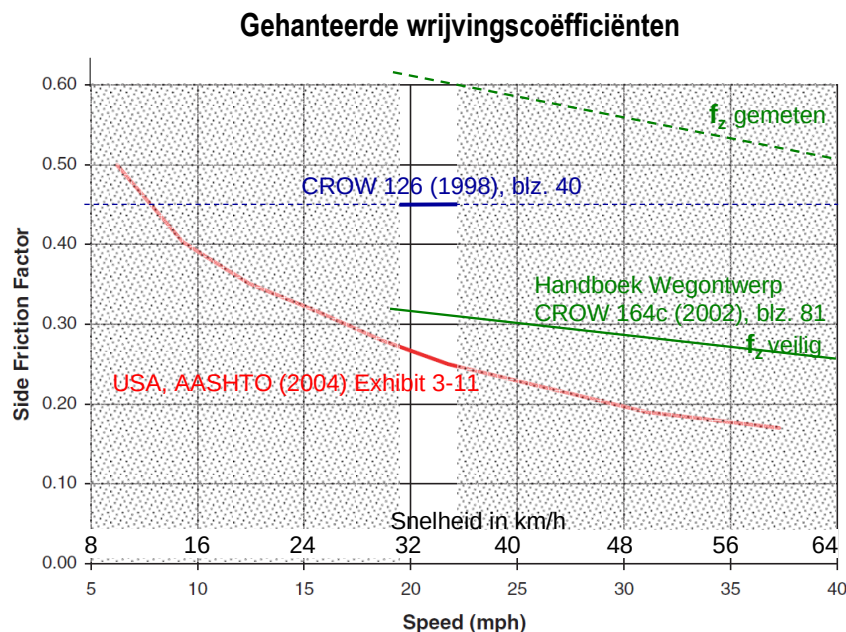
a) elk individu hanteert steeds een voor hem of haar acceptabel risico niveau en
b) het geheel van homeostatische gedragingen leidt tot homeostatische gedrag van het geheel.

Daarbij merkt Michon op: "Ongelukkigerwijze is geen van deze twee assumpties noodzakelijk juist".

wegen onvoldoende⁹, zodat het mogelijk is een optimale wegbreedte vast te stellen (Braimaister en Fortuijn, 2005).

Een ander voorbeeld betreft de wijze waarop autobestuurders rotondes berijden. Met een rotonde wordt beoogd de veiligheid te verhogen door vereenvoudiging van de conflictafhandeling en lagere conflictsnelheden (paragraaf 2.3.3). Conform de theorie van risicohomeostasis zien we dat bestuurders dit hogere veiligheidsniveau compenseren door kleinere hiaten te accepteren. In Duitsland wordt bijvoorbeeld op rotondes een kritisch hiaat gemeten $< 4,3$ s (FGSV, 2006) en op kruispunten $> 5,6$ s (Weinert, 2001).

Eenzelfde verschijnsel doet zich vermoedelijk voor bij de doorrij snelheid van rotondes. Bij de centrifugale kracht die volgens formule (d.2) op blz. 233 door automobilisten wordt geaccepteerd¹⁰, bedraagt de bijbehorende wrijvingscoëfficiënt $f_z = 0,46$. Deze is veel hoger



Figuur C.1-2 Gehanteerde waarde voor wrijvingscoëfficiënt in formule voor de doorrij-snelheid door rotondes in vergelijking met andere waarden

⁹ Fuller (a.w., p.55-56) noemt ook dit voorbeeld: toename van de rijstrookbreedte verhoogt de gemiddelde snelheid (5-10 km/h per meter extra rijstrookbreedte), maar er treedt ook een reductie van de ongevalfrequentie op; toevoeging van een verharde berm aan een tweestrooksweg verhoogt de snelheid met 10%, maar er treedt een verlaging van ongevallencijfers op van 40%.

¹⁰ Genoemde formule (d.2) komt voor het eerst voor in CROW 79 (1993) met de vermelding: 'Bij krappe boogstralen bestaat het volgende verband tussen de snelheid in de boog en de boogstraal'. De bron van deze formule wordt niet vermeld, maar verondersteld mag worden, dat er enig onderzoek aan ten grondslag ligt. Duidelijk is, dat de opstellers van genoemde formule er van uitgaan dat bestuurders op rotondes bij lage snelheden een veel kleinere veiligheidsmarge hanteren dan ontwerpers dienen te hanteren voor bogen in het horizontaal alignment. Daarbij moet wel worden bedacht dat er ook een verschil bestaat tussen droog wegdek en nat wegdek. De ontwerpnorm moet ook gelden bij een nat wegdek, terwijl de doorrijcurve uiteraard geldt voor een droog wegdek.

dan de 0,31 die volgens Figuur 7-5 van het Handboek Wegontwerp –Gebiedsontsluitingswegen (CROW, 2002, blz. 81) als een veilige waarde moet worden aangemerkt, en ver boven de waarde 0,27 die bij 35 km/h als comfortgrens wordt vermeld voor horizontale bogen¹¹. Dit wijst mogelijk op het accepteren van een hoge discomfortgrens en een kleine veiligheidsmarge met betrekking tot slipgevaar bij het berijden van rotondes.

In datzelfde kader past de aanname voor de rijcurve door een traditionele tweestrooksrotonde, namelijk dat de rijstrookmarkering wordt genegeerd, zodat bestuurders bij hetzelfde discomfort de snelheid minder hoeven te verlagen. Van die instelling bij bestuurders van personenauto's is niet alleen de auteur uitgegaan bij de ontwikkeling van de turborotonde, maar dit uitgangspunt wordt ook in beeld gebracht in Figuur D.3-4 (bron TRB, 2010, p. 6-55). Ondanks de hogere risiconiveaus die autobestuurders op grond van het voorgaande zouden accepteren bij het berijden van een rotonde, laten de ongevallencijfers een hogere veiligheid zien. Deze veiligheidswinst dient voornamelijk op het conto van de lage snelheid geschreven te worden, waardoor niet alleen de ernst van een ongeval minder is, maar ook de mogelijkheid tot herstel van een fout groter is.

C.2. Informatieverwerking en wegontwerp

C.2.1. Basismodel informatieverwerking gerelateerd aan hiërarchische en cognitieve taakniveaus

Inzicht in de factoren die een rol spelen in de informatieverwerking van weggebruikers kan van belang zijn voor het zodanig aanpassen van het wegontwerp, dat weggebruikers ook inderdaad veilig gebruik kunnen maken van de aangeboden infrastructuur. Een belangrijk aspect is, dat de weggebruiker tijd nodig heeft om als verkeersdeelnemer te reageren op de verkeerssituatie. De verkeerssituatie wordt bepaald door:

- alignement en dwarsprofiel;
- verkeerstekens (belijning, bebording en verkeerslichten);
- andere verkeersdeelnemers (potentieel conflict/ zo ja, snelheid en/of koers aanpassen?).

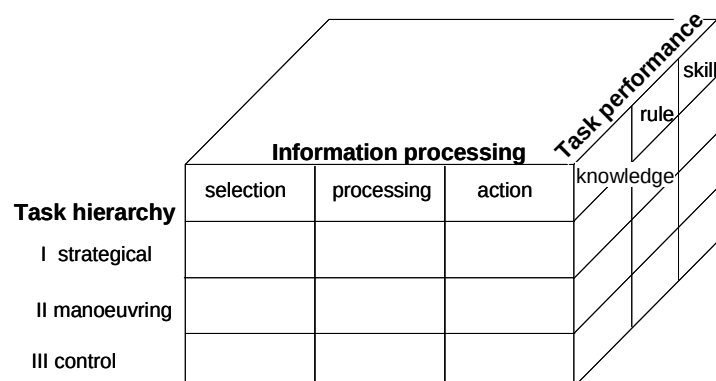
De verkeersdeelnemer moet op de combinatie van deze componenten van de verkeerssituatie reageren.

Een inzicht biedend basismodel voor de informatieverwerking is te vinden in Theeuwes, (2002). Daarin wordt een driedimensionaal model voor de factoren die de rijtaak bepalen gepresenteerd (zie Figuur C.2-1).

Onderscheiden worden:

- de hiërarchie in functionele taken (task hierarchy)
- de cognitieve niveaus in de taakfunctie (task performance)
- de opeenvolgende fasen in het informatieverwerkingsproces (information processing).

¹¹ En die redelijk overeenkomt met de waarden uit AASHTO 2004 waarnaar TRB 2010 verwijst. Dit betekent overigens, dat een berekende doorrijnsnelheid door rotondes volgens de Amerikaanse richtlijnen (AASHTO, 2004) veel lager is dan de doorrijnsnelheid die is berekend op basis van CROW-publicatie 126 (CROW, 1998).



Figuur C.2-1 Structuur van de bestuurderstaak in drie dimensies (Theeuwes, 2002)

Functionele hiërarchie van taken

Bij het onderscheid in taakhiërarchie staat het functionele aspect centraal. Hierin hanteren gedragswetenschappers verschillende indelingen. Michon (1989) bijvoorbeeld onderscheidt hierin de volgende drie niveaus: I Strategisch (voorbereiden van de verplaatsing in de keuze van de bestemming, route en voertuig; dit wordt ook als planning aangeduid), II Tactisch (manoeuvregedrag in het reageren op de omstandigheden van het moment), III Controle (operationele controle in het verrichten van essentiële taken op vaardigheidsniveau in het bedienen van het voertuig). Dit overlapt de indeling die Theeuwes hanteert:

- Strategisch niveau (keuze van de bestemming, tijdstip vertrek, routekeuze, etc.)
- Manoeuvre niveau (voorrang verlenen, inhalen, bocht inschatten, etc.)
- Controle niveau (koers houden, schakelen, etc.).

Cognitieve taakuitvoeringsniveaus

Rasmussen (1985, 1987) onderscheidt drie cognitieve niveaus waarop informatie wordt verwerkt op basis waarvan handelen tot stand komt:

- a) Knowledge-based (kennisniveau)
- b) Rule-based (regelniveau)
- c) Skill-based (vaardigheidsniveau)

Elk niveau karakteriseert zich door de tijd die voor de informatieverwerkingscyclus nodig is. Bekend is dat naarmate de beschikbare tijd korter wordt dan de benodigde tijd, de foutkans toeneemt. Inzicht hierin is voor de ontwerper van groot belang. De benodigde tijdsruimte van een verwerkingscyclus is sterk afhankelijk van het mentale (cognitieve) niveau waarop een taak moet worden uitgevoerd.

Samenhang tussen functioneel en cognitief niveau

Voor de ervaren bestuurder bestaat er een rechtstreekse samenhang tussen de functionele taak en het cognitieve verwerkingsniveau. Maar voor de minder ervaren bestuurder ligt dat weer anders: iemand die rijlessen krijgt moet bijvoorbeeld nadenken bij het bedienen van koppeling en versnellingshendel. Daarom dienen ze als afzonderlijke dimensies te worden beschouwd in de bestuurderstaak. Inzicht hoe die met elkaar samenhangen in bepaalde onderdelen van de rijtaak biedt Tabel C.2.1, die in de literatuur in variaties voorkomt (o.a. Hale et al, 1990).

Tabel C.2.1 Relationship between Performance Levels of Control (Rasmussen) and Hierarchy of Driving Tasks (Michon) reflected in exemplary (sub)tasks

	Strategic tasks (planning)	Tactical tasks (manoeuvre)	Operational tasks (control)
Knowledge-based	Navigating in unfamiliar area (strange town)	Control a skidding car	Novice in the first lesson(s)
Rule-based	Select between familiar routes	Passing other cars	Driving an unfamiliar car
Skill-based	Route taken daily for commuting	Negotiating a familiar intersection	Vehicle handling in curves

Informatieverwerkingscyclus

In het informatieverwerkingsproces worden drie à vier fasen onderscheiden. Theeuwis noemt in a.w. :1) selecteren (selection), 2) verwerken (processing), 3) handelen (action).

Ook worden wel vier fasen in de menselijke informatieverwerkingscyclus onderscheiden (Janssen, 2003): 1) waarnemen, 2) verwerken, 3) beslissen en 4) handelen. Met selecteren en waarnemen wordt dezelfde fase aangeduid, met in het ene geval meer de nadruk op het meest essentiële aspect (selectie van informatie) en in het andere geval het meer direct zintuiglijke aspect. Verder splitst Janssen de verwerkingsfase op in verwerken en beslissen. In feite zijn deze indelingen niet meer, maar ook niet minder, dan een theoretisch model: de fasen kunnen experimenteel – althans zonder neurologisch onderzoek – niet worden vastgesteld, maar het onderscheid in fasen werkt wel inzichtverdiepend.

C.2.2. Informatieverwerking op kennisniveau

Informatieverwerking op kennisniveau is nodig om een nieuwe situatie te kunnen beoordelen. Het is noodzakelijk om abstracte kennis te gebruiken om de situatie ‘herkenbaar’ te krijgen. Informatieverwerking op kennisniveau wordt aangewend om een doel te bereiken. Een duidelijk voorbeeld is routekeuze in een onbekende situatie. Daarbij speelt keuze tussen alternatieve plannen veelal een rol. Voor deze taak varieert de benodigde tijd van 6-10 seconden (Martens, 2001, p.17¹²) tot minuten en uren (thuis een routeplannen, Hale a.w.). In de verkeerssituatie is het van belang om in (voor groepen van weggebruikers) nieuwe situaties zodanige informatie aan te bieden dat voor een zeer belangrijk deel teruggevallen kan worden op handelen gebaseerd op informatieverwerking op regelniveau.

C.2.3. Informatieverwerking op regelniveau

Kenmerkend hiervoor is dat de aangeboden informatie herkend wordt als behorende bij een aantal alternatieve sets handelingen: de beschikbare informatie bepaalt niet automatisch het gedrag. Eerst wordt bewust een regel gekozen op grond waarvan wordt beslist. De tijd die met informatieverwerking op regelniveau minimaal nodig is ligt in de orde van grootte van een enkele seconde. Bijvoorbeeld hebben Olson & Sivak (1988) de totale reactietijd gemeten om

¹² De tijd benodigd voor het kiezen van de juiste rijstrook uit twee mogelijkheden bij nadering van een turbotronde, gerekend vanaf 500 m voor de rotonde bij een snelheid van 80 km/h (Martens, a.w p 15). De feitelijke reactietijd is dus kleiner. Bij een bebording en markering die eenduidig en goed herkenbaar zijn, kan dit overigens een strategische taak zijn die op regelniveau wordt verricht.

te remmen nadat de bestuurder werd verrast door een obstakel, die varieerde tussen de 0,8 en 1,8 seconde, afgerond 1 à 2 seconde (Figuur C.2-2, ontleend aan Summala, 2002).

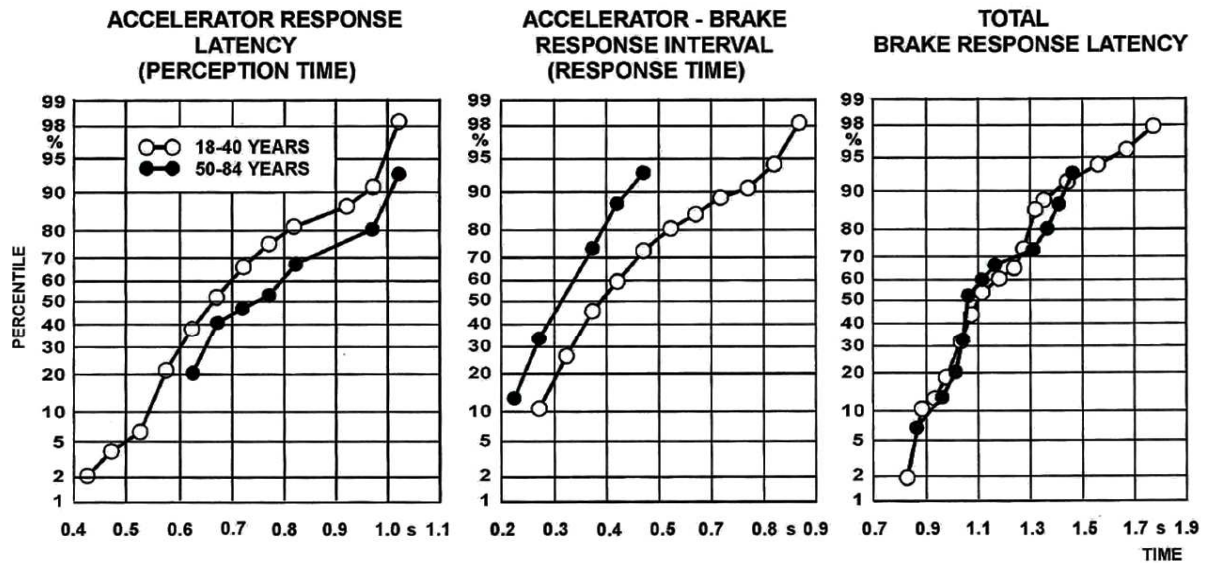


Figure 3. Perception time, response time and total brake reaction time for younger (18-40 years) and older (50-84 years) drivers in the surprise situation of Olson and Sivak's (1986) study, in which drivers for the first time encountered an obstacle in their path after a hill-crest. Adapted by Summala, 2000, from figures 1-6, Human Factors, 1986, 28(1), 91-96. (By permission of Human Factors and Ergonomics Society.)

Figuur C.2-2 Reactietijd op onverwacht obstakel, onderscheiden in perceptie en respons

C.2.4. Informatieverwerking op vaardigheidsniveau.

Dit type informatieverwerking gebeurt routinematig: de verbinding tussen signaal en reactie komt automatisch tot stand. Handelen op vaardigheidsniveau is in feite een continue taak. In de rijtaak zijn koers houden en afstand houden hiervan voorbeelden. Kenmerkend is, dat de feedback samenvalt met informatie vanuit een nieuwe situatie en daarbij input vormt voor (zo mogelijk) nieuw handelen. De tijd die met informatieverwerking op taakniveau minimaal nodig is, ligt in de orde van grootte van tienden van seconden, maar hoe meer de reactie in een continu proces 'automatisch' plaatsvindt, hoe kleiner de responstijd (Hale et al, spreekt in a.w. zelfs over milliseconden).

C.2.5. Relevantie

Voor de ontwerppraktijk is vooral de reactietijd op regelniveau van belang. Bijvoorbeeld als voorrang moet worden verleend aan andere verkeersdeelnemers. In de verkeerskundige ontwerppraktijk bestaat de tendens om in complexe verkeerssituaties het beslissingsproces te 'vereenvoudigen' door het in delen te splitsen. Een bekend voorbeeld is de introductie van een verkeersgeleider, die een oversteek in tweeën knipt. Het is echter de vraag of dit altijd ten gunste van de veiligheid is. Er zijn aanwijzingen dat het opknippen van een complex informatieverwerkingsproces in twee meer eenvoudige processen die elkaar binnen 1 à 2 seconden opvolgen de veiligheid nadelig beïnvloedt door verhoging van de foutkans. Zie hiervoor bijvoorbeeld paragraaf 2.3.1 (blz. 30 hoofdstuk).

Ook biedt deze theorie een verklaring voor de verschillen in veiligheid van voorrangregelingen op rotondes. Als verkeer op de aansluitende takken voorrang heeft, moet de bestuurder op de rotondes na het afronden van de taak om koers te houden bij het oprijden

van de rotonde al weer binnen 2 seconde voorrang verlenen aan voertuigen van de volgende tak. De significante reductie van het aantal letselongevallen van ca. 40% die Blackmore (1963) heeft gevonden op de eerste zes rotondes nadat de voorrangsregel was veranderd in de regel 'rotondeverkeer voorrang' (ondanks dat het om een nieuw fenomeen ging voor de verkeersdeelnemers) past hierin¹³.

Hetzelfde geldt voor al dan niet voorrang voor fietsverkeer op rotondes. Als fietsers voorrang hebben moet een automobilist binnen 1 seconde voorrang verlenen aan een overstekende fietser na het uitvoeren van de stuurmanoeuvre om de rotonde te verlaten. Doordat goed uitgevoerde bochten een fietser afremmen tot een snelheid die een factor drie lager ligt dan van die van een automobilist, heeft deze meer tijd tot zijn beschikking tussen twee opeenvolgende fasen in het informatieverwerkingsproces (D.6.2). Omdat een oversteek van een dubbele rijstrook complexer is, zijn bij turborotondes chicanes geïntroduceerd (D.6.3). Ook levert dit het inzicht op, dat zo'n fietsoversteek weliswaar snelheidsverlagend moet worden uitgevoerd, maar wel voldoende breed moet zijn, zodat de stuurtaak voor de fietsers nauwelijks een mentale belasting oplevert.

¹³ Uiteraard zijn ook hierbij kanttekeningen te maken. De gewone voorrangsregeling in Groot Brittannië is wellicht nog minder geschikt voor rotondes dan de regel 'rechts voorrang' op het continent, zodat een verbetering op het punt van herkenbaarheid in Groot Brittannië ook een rol kan hebben meegespeeld. In Nederland waren de verkeerskundigen van mening dat de belangrijke winst op het punt van herkenbaarheid pas verkregen werd, als tegelijk met het omdraaien van de voorrang ook de takken radiaal werden aangesloten.

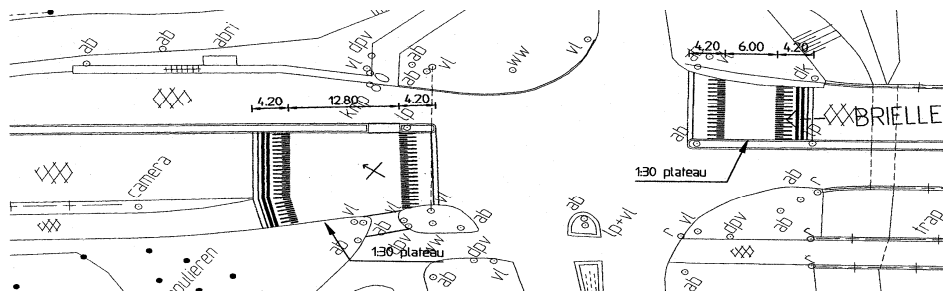
Bijlage D. Algemene ontwerpaspecten

D.1. Plateaus bij verkeerslichten

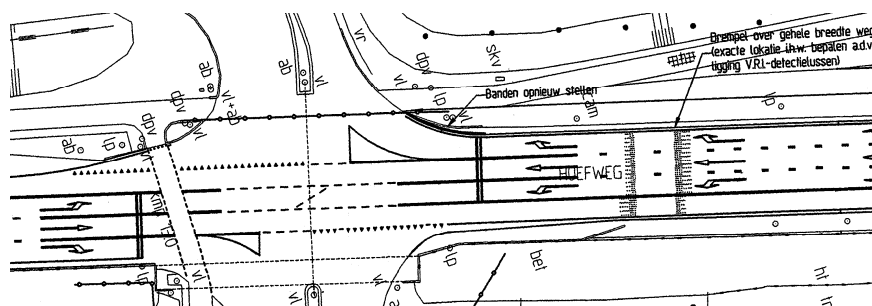
Het is van belang dat plateaus aan strenge criteria voldoen om:

- enerzijds een effectieve snelheidsreductie te bewerkten (homogeniteits);
- anderzijds geen onnodig discomfort te veroorzaken (functionaliteits).

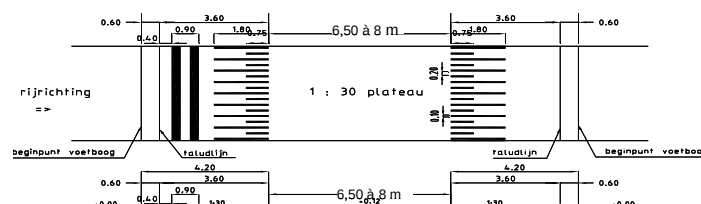
Met de situering van het plateau kan worden gevarieerd: óf direct na de stopstreep (maar vóór het kruisingsvlak), óf zo'n 30 à 50 m vóór de stopstreep.



Figuur D.1-1 Tekening van een plateau-oplossing achter de stopstreep van een verkeersregelininstallatie (bron Provincie Zuid-Holland)



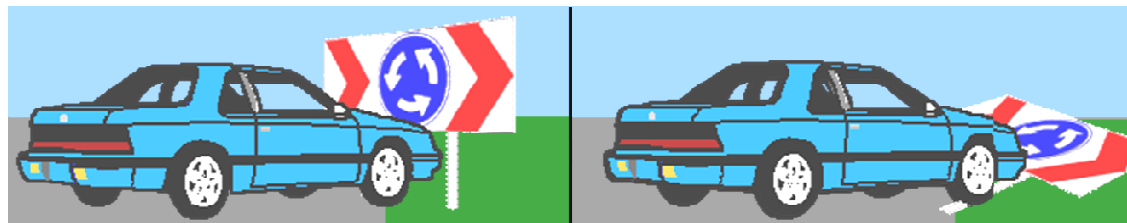
Figuur D.1-2 Tekening van een plateau-oplossing 30 m voor de stopstreep van een verkeersregelininstallatie (bron Provincie Zuid-Holland)



Figuur D.1-3 Plateau bij geregelde kruispunten (50 km/h), geïntegreerd met stopstreep van een verkeersregelininstallatie

D.2. Rotondeschild

Een rotondeschild dient zodanig te zijn vormgegeven, dat voldaan is aan twee principes van Duurzaam Veilig: herkenbaarheid en vergevingsgezindheid. Dat vereist een visuele ‘onontkoombaarheid’ (ook vanaf grote afstand), zonder fysiek in grote mate kwetsend te zijn.

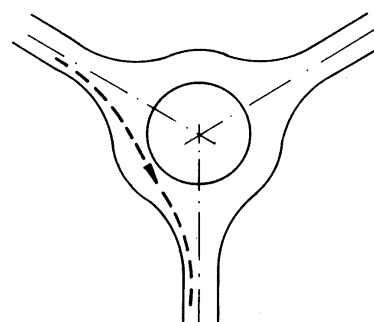


Figuur D.2-1 *Rotondeschild dat de horizon afschermt en bij aanrijden in zijn geheel naar achteren klapt.*

D.3. Toetsing snelste doorrijcurve rotondes

In Nederland¹⁴ is vanaf de allereerste rotondehandleiding (Verkeerspleinen, publikatie 24, CROW, 1989) aandacht besteed aan de reductie van de doorrij snelheid. Op blz.32 van genoemde publicatie is bijvoorbeeld Figuur D.3-1 opgenomen met het onderschift:

“ Symmetrisch verkeersplein met drie aansluitende wegtakken.
Probleem: snelheid rechtsafslaand verkeer”



Figuur D.3-1 *Rijcurve op een rotonde waarop de takken onder 120° op elkaar aansluiten*

In de volgende rotondehandleiding (CROW, 1993) wordt specifiek aandacht besteed aan de doorrij snelheid. Op bladzijde 27 wordt de bepaling van de straal van de rijcurve op de rotonde gevisualiseerd, met vermelding van een formule, waarmee de straal van de doorrijcurve berekend kan worden¹⁵. Toch is het de vraag of in de ontwerp praktijk aan het beperken van de straal van de doorrijcurve voldoende aandacht wordt besteedt.

Het verloop van de snelste doorrijcurve is in hoge mate bepalend voor de veiligheid van rotondes. De benadering in CROW-126 ‘Eenheid in rotondes’ (CROW, 1998) gaat uit van takken die geheel in elkaars verlengde liggen. Verder is het uitgangspunt dat het hart van de

¹⁴ Uit de toename met 91 % van alle ongevallen en nog sterker van het aantal met doden en gewonden (Green (1977) als gevolg van het ombouwen van ‘conventional roundabouts’ naar ‘mini-roundabouts’ (even groot, maar met een kleiner middeneiland) was toen al bekend dat een kleinere uitbuiging van de rijcurve tot een substantiële afname van de veiligheid van rotondes leidt.

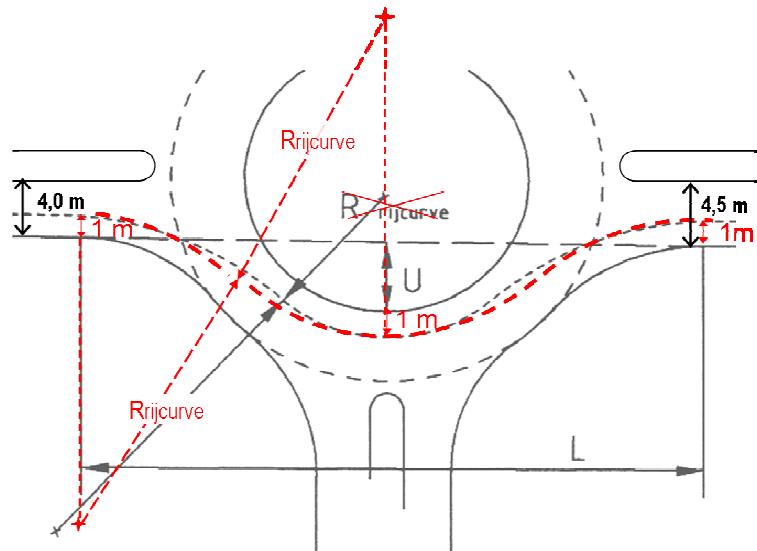
¹⁵ Helaas is de tekening niet heel duidelijk. Onduidelijk is dat het uitgangspunt in de formule is, dat het hart van de auto op de naderingstak 1 m afstand tot de buitenkant van het asfalt en op de rotonde tot de binnenkant van het asfalt aanhoudt. In de volgende CROW-uitgave (publicatie 126) is Figuur D.3-2 er niet beter op geworden.

personenauto op 1 m afstand van de rand asfalt blijft, zowel op de aansluitende takken als op de rotonde zelf. Op basis daarvan is de formule voor de straal van de rijcurve afgeleid:

$$R_{rijcurve} = \frac{((0,25) \cdot L)^2 + (0,50 \cdot (U + 2))^2}{U + 2} \quad (d.1).$$

Uitgangspunt hierin is, dat de inrijstraal gelijk is aan de uitrijstraal, d.w.z. in de benadering van de doorrijcurve wordt afgezien van eventuele deceleraties en acceleraties. De betekenis van de symbolen L en U wordt toegelicht in Figuur 4 van genoemde publicatie. Genoemde figuur bevat enkele tekenfouten, die in Figuur D.3-2 zijn gecorrigeerd

Figuur D.3-2 *Bepaling straal van de snelste rijcurve op rotonde (CROW-126)*



Als verband tussen de snelheid in de boog en de boogstraal wordt in genoemde publicatie de formule gehanteerd:

$$\text{snelheid} = 7,4 \cdot \sqrt{(R_{rijcurve})} \quad (d.2).$$

Hierin is $R_{rijcurve}$ in meters, en de snelheid in km/h. Uit de waarde 7,4 in de voorgaande formule volgt bij een afschot van 2,5% voor de centrifugale versnelling a :

$$a = \left(\frac{7,4}{3,6}\right)^2 + \frac{2,5}{100} \cdot 9,8 = 4,2253 + 0,245 = 4,47 \text{ m/s}^2 \approx 0,456g. \quad (d.3)$$

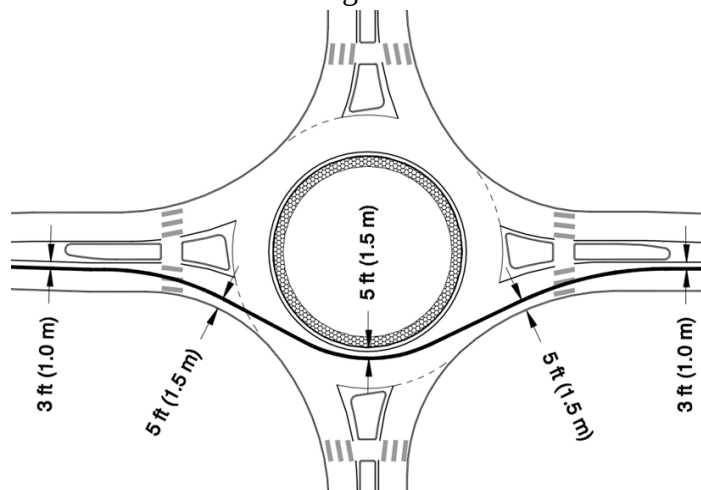
In werkelijkheid wijken de geaccepteerde versnellingen hiervan af omdat:

- in de benadering van de rijcurve geen rekening wordt gehouden met de tijd om het stuur te draaien, noch met remmen en optrekken door een deel van de bestuurders;
- in werkelijkheid bestuurders verschillende centrifugale versnellingen accepteren.

Maar voor de vergelijking van rotondeontwerpen qua doorrij snelheid is deze benadering bruikbaar.

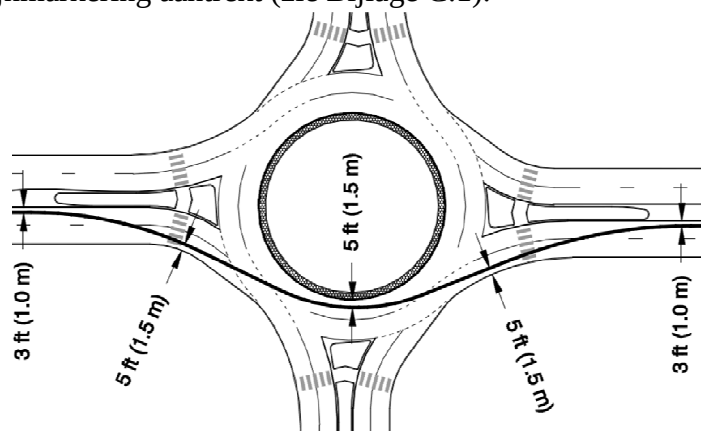
De beperking van formule (d.1) is, dat deze alleen geldt als de takken precies in elkaars verlengde liggen. Een meer integrale benadering wordt gegeven in de Amerikaanse handleiding 'Roundabouts, An Informational Guide' (FHWA, 2000). Afbeelding 6-5 geeft aan waardoor de rijcurve van het snelste voertuig door een enkelstrooksrotonde bepaald wordt (in TRB, 2010 is dit afbeelding 6-48). Die wordt bepaald door vijf 'dwangpunten'. De curve start 1 m links van de middengeleider van de aanvoertak, blijft 1,5 m uit de rechterzijde van de uitmonding op de rotonde (de aansluitboog), passeert de rammelstrook rond het

middeneiland op 1,5 m en bevindt zich dan in de meest buitenste positie. Daarna gaat het met dezelfde straal weer verder totdat de rijcurve op 1,5 m afstand de aansluitboog van de uitrit passeert, waarna die op de afvoertak op 1 m afstand van de middengeleider eindigt. Met een tekenprogramma is het mogelijk, met deze vijf dwangpunten als randvoorwaarde, drie bogen te tekenen die dezelfde straal hebben¹⁶. Zie Figuur D.3-3.



Figuur D.3-3 *Fastest vehicle path through Single-lane Roundabout*
(TRB, 2010, p.6-55)

In Figuur D.3-4 is hetzelfde gedaan voor een tweestrooksrotonde¹⁷. Er wordt van uitgegaan dat een automobilist die met zo min mogelijk discomfort de rotonde rechtdoor wil berijden zich niets van de lijnmarkering aantrekt (zie Bijlage C.1).



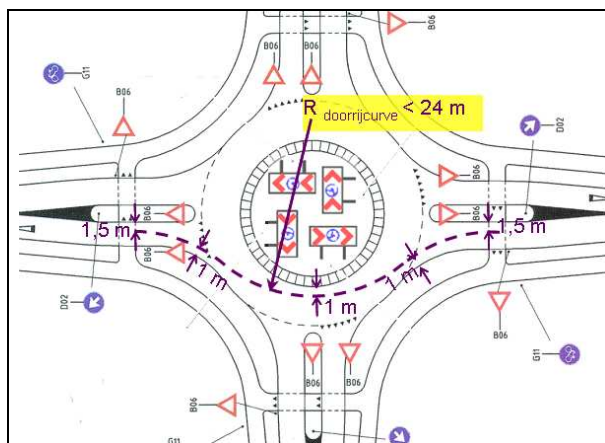
Figuur D.3-4 *Fastest vehicle path through Multilane roundabout*
(TRB, 2010, p.6-55)

In Nederland worden zowel in de aansluitoksels als rond het middeneiland verhoogd overrijdbare stroken toegepast. Daardoor is het risicogevoel bij de bestuurder om dichtbij de rotonderanden te rijden in Nederland kleiner. Het ligt dan ook voor de hand om voor de Nederlandse situatie overal de afstand van 1 m tot de dwangpunten aan te houden, cf. het

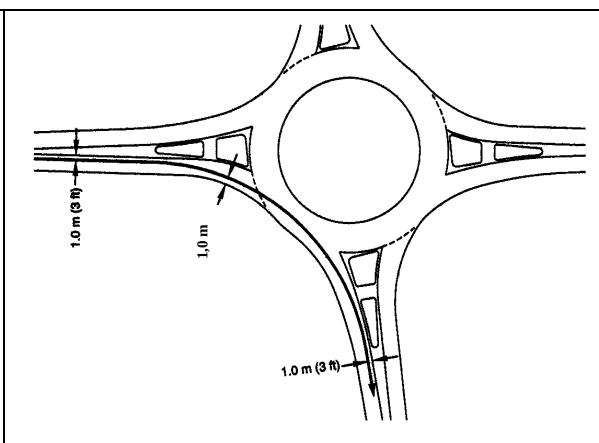
¹⁶ Deze curven kunnen in AutoCad getekend worden met het commando TTR (tangens, tangens, radius) onder menu 'circle'.

¹⁷ In V&W (2009b) *Roundabouts - Application and design; A practical manual* wordt eveneens het belang van het reduceren van de doorrijnsnelheid en het risico van weef- en snijconflicten benadrukt.

uitgangspunt van formule (d.1). Dan ontstaat een benadering als weergegeven in Figuur D.3-5 en Figuur D.3-6.



Figuur D.3-5 *Maatvoering voor toets op doorrijksnelheid*



Figuur D.3-6 *Voorbeeld van een rijcurve van de snelste auto die rechtsaf slaat*

Opgemerkt dient te worden, dat op deze wijze een iets ruimere rotondestraal verkregen wordt dan met vergelijking (d.1). Om een vergelijkbare doorrijksnelheid te verkrijgen dient in formule(d.2) de factor 7,4 vervangen te worden door 7,2 zodat de formule wordt:

$$\text{snellheid} = 7,2 \sqrt{(R_{\text{rijcurve}})} . \quad (\text{d.4})$$

Bij de aanbevolen maximale doorrijksnelheid van 35 km/h bij een $R_{\text{rijcurve}} \leq 22 \text{ m}$ in *Eenheid in rotondes* (CROW,1998, p.40) hoort dan een straal van de rijcurve $R_{\text{rijcurve}} \leq 24 \text{ m}$.

D.4. Uitgangspunten bestreken baan voor bochtverbreding en overrijdbare stroken

D.4.1. Algemeen

In Europa moeten voertuigen die zonder ontheffing op de openbare weg rijden een bestreken baan hebben, waarvan bij een buitenstraal van 12,50 m de binnenstraal niet kleiner is dan 5,30 m. Hierop zijn uitzonderingen voor bijvoorbeeld het vervoer van ondeelbare lading. Tegen die achtergrond ligt het voor de hand om voor de toets op berijdbaarheid door vrachtauto's de volgende criteria te hanteren:

Rijbaanbreedte zodanig, dat die voldoende is voor de 16,5 m lange trekker met oplegger met lage snelheid, die voldoet aan de Europese norm voor de bestreken baan¹⁸: bij $R_{\text{buiten}} = 12,50 \text{ m}$ is $R_{\text{binnen}} \geq 5,30 \text{ m}$.

Overrijdbaar verhoogde stroken zo breed, dat de rotonde in alle richtingen bereden kan worden door een voertuigcombinatie voor een specifiek doel (vervoer van ondeelbare lading < 22 m) of anderszins gebruikmakend van een ontheffing (totale lengte < 23 m) , waarvan de

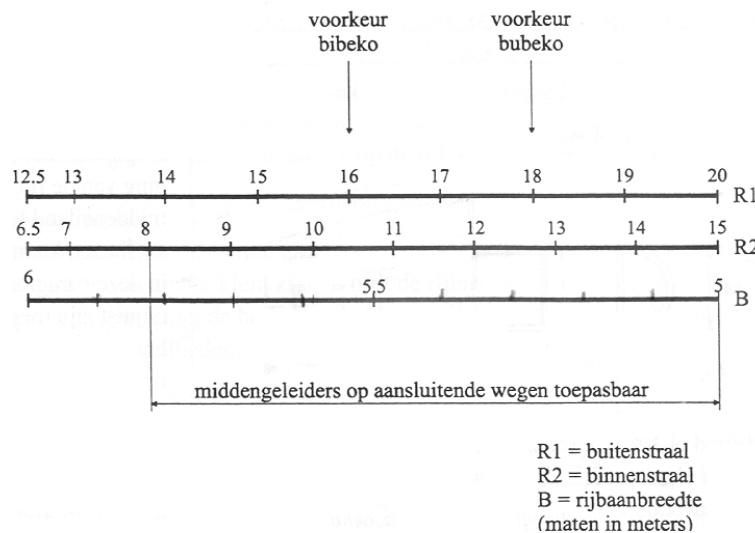
¹⁸ In Nederland is dit vastgelegd in de *Regeling voertuigen* (V&W, 2009a), Artikel 5.18.16. Deze regeling is gebaseerd op Richtlijn 96/53/EG van de Raad (laatstelijk gewijzigd bij Richtlijn 2002/7/EG van het Europees parlement en de Raad). De waarden in Richtlijn 96/53/EG zijn in Richtlijn 97/27/EG, artikel 7.6 als toelatingsrichtlijn voorgeschreven.

bestreken baan voldoet aan de eis¹⁹: $R_{\text{buiten}} = 14,50 \text{ m}$ met $R_{\text{binnen}} \geq 6,50 \text{ m}$, waarbij aan beide zijden een speling²⁰ van 1 m aangehouden dient te worden.

Draagkrachtige berm in de oksels zodat ook grotere voertuigen (met een routeplichtige ontheffing en een ruimere bestreken baan) de rotonde kunnen berijden, terwijl bermshade wordt voorkomen²¹. Hiervoor is een bestreken baan²² aan te houden van een trekker-opleggercombinatie waarvoor geldt $R_{\text{buiten}} = 16,50 \text{ m}$ met $R_{\text{binnen}} \geq 7,50 \text{ m}$, met aan beide zijden een marge van 1 m.

D.4.2. Breedte rotondebahn

Bij rotondes is de rijbaanbreedte een zeer kritisch element voor de veiligheid: hoe breder de rijbaan hoe groter de doorrijnsnelheid voor personenauto's, hoe groter de ernst van een optredend ongeval. In CROW-publicatie 126 is in figuur 3 de aanbevolen breedte van de rotondebahn in relatie tot de buitenstraal van de rotonde in beeld gebracht. Zie Figuur D.4-1.



Figuur D.4-1 Samenhang tussen breedte rotondebahn en rotondestraal

De maatvoering van de breedte van de rotondebahn is hierin zodanig, dat hoe kleiner de buitenstraal van de rotonde is, hoe eerder de overrijdbaar verhoogde strook gebruikt moet worden door grotere voertuigen. Omdat veelal kleine rotondestralen worden toegepast op wegen met een beperkt doorgaand karakter, betekent dit niet, dat per saldo de overrijdbaar verhoogde strook op rotondes met een kleinere straal vaker gebruikt moet worden.

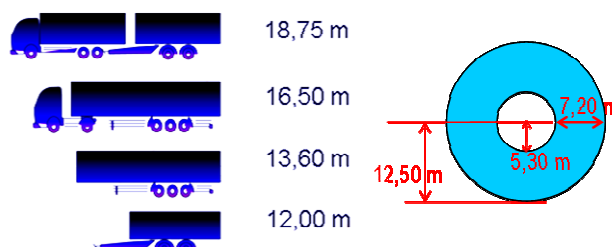
¹⁹ Deze maat is o.a. afgeleid uit *Beleidsregel ontheffingverlening exceptionele transporten RDW 2010* (RDW, 2010), Artikel 6.a, Bijlage A.II, onderdeel II: Draaiproefseisen, *proef III, Lengte samenstel (CT)*: $20 < CT \leq 23 \text{ m}$, bij een doorreden hoek van 120° en een uitscheermaat $U \leq 1,40 \text{ m}$.

²⁰ Ontleend aan *Geometric Design of Roundabouts* (DTF, 2007), Part 3 of Section 2 'Junctions', Design Manual for Roads and Bridges, Volume 6 'Road Geometry', Standards for Highways, Highways Agency, Department for Transport. London, UK, Figure 7/4, p.7/4 'Turning Widths Required for Smaller, Normal or Compact Roundabouts'. www.dft.gov.uk/ha/standards/dmrb/vol6/section2/td1607.pdf.

²¹ Daardoor zijn op deze bermen geen schampblokken –die een potentieel gevaar opleveren– nodig.

²² Deze maat is afgeleid uit *Beleidsregel ontheffingverlening exceptionele transporten RDW 2010*, Artikel 6.a, Bijlage A.II, onderdeel II: Draaiproefseisen, *proef IV, Lengte samenstel (CT)*: $23 < CT \leq 27 \text{ m}$, bij een doorreden hoek van 120° en een uitscheermaat $U \leq 1,70 \text{ m}$.

Vrachtwagen-aanhangwagencombinaties die zonder bijzondere voorwaarden de Nederlandse wegen mogen berijden zijn maximaal 18,75 meter lang (Europese richtlijn²³). Voor rotondes zijn gelede voertuigen (trekker-opleggercombinatie) echter meer maatgevend vanwege hun bestreken baan. Het voertuig dat voldoet aan de Europese eisen voor de bestreken baan kan worden beschouwd als het voertuig waarvan de maximale eisen voor de maatvoering van de rijbaan kan worden afgeleid. Dat is een trekker-opleggercombinatie van 16,50 m lengte.



Figuur D.4-2 Toegestane voertuigafmetingen met de maatgevende bestreken baan
(ontleend aan G.L. Bordewijk, RDW²⁴, Symposium ‘Voertuigafmetingen’ 3 juni 2008)

Voor de bestreken baan is de afstand tussen koppelingsspen en achteras van de oplegger (ook wel wielbasis van de oplegger genoemd: WO) mede bepalend. Artikel 7.6.1.2 van Bijlage 1 Richtlijn 97/27/EG geeft daarvoor de formule:

$$WO \leq \sqrt{(12,50 - 2,04)^2 - (5,30 - BO/2)^2} \quad (\text{d.5}).$$

Deze formule resulteert in samenhang met de overige voertuigbepalingen in een oplegger van Figuur D.4-7 (zie blz. 241). In D.4.5 zal ook blijken dat dit artikel technisch niet geheel consistent is met Artikel 7.6.1 van dezelfde Bijlage van Richtlijn 97/27/EG. In de praktijk wordt de maatvoering van de wielbasis van de oplegger echter in hoge mate bepaald door de gewichtsverdeling over de koppeling en de achterassen. De gebruikelijke maximale koppelingsdruk is 12 ton (bij toepassing van twee-assige trekkers). Uitgaande van een oplegger met een lengte van 13,60 m, een extra totaal gewicht van de opleggerassen van 3000 kg, een koppelingsdruk van 12 ton en een last onder de drie achterassen van $3 \times 9 = 27$ ton, kan berekend worden, dat bij een gelijkmatig verdeelde belasting van de lading, een afstand van $WO = 7,80$ m tussen koppelingsspen en het hart van het asstel optimaal is²⁵ (zie Figuur D.4-3). De achteroverbouw (die bepalend is voor de uitscheermaat²⁶ U) bedraagt dan 4,20 m.

Omdat bij rotondes de breedte van de rijbaan van grote invloed is op de veiligheid, is de keuze voor dit voertuig een goed uitgangspunt. Daarbij moet bedacht worden dat grote voertuigen altijd van de rammelstrook gebruik kunnen maken, zowel rond het middeneiland als in de aansluitoksels. De enigszins beperkte rotondebanaanbreedte die van deze keuze voor

²³ Richtlijn 2002/7/EG, artikel 10.7.a.

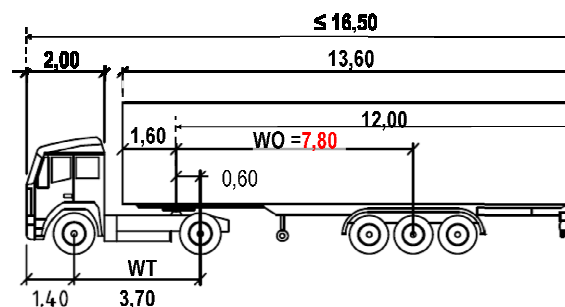
²⁴ De RDW is de instelling die de registratie van gemotoriseerde voertuigen en rijbewijzen in Nederland verzorgt. De naam RDW is oorspronkelijk afgeleid van de benaming Rijksdienst voor het Wegverkeer, maar dat is niet de officiële naam. De Wegenverkeerswet 1994 (V&W, 1994) bepaalt in hoofdstuk IA, Artikel 4a: ‘Er is een Dienst Wegverkeer, in het maatschappelijk verkeer aangeduid als RDW. De dienst bezit rechtspersoonlijkheid en is gevestigd te Zoetermeer’.

²⁵ Met dank aan W. Richie van de RDW voor de in 2007 uitgevoerde berekening.

²⁶ In de *Regeling voertuigen 2011* worden nog uitsluitend voor bussen eisen aan de uitscheermaat U gesteld. De RDW heeft voor de voertuigen die met ontheffing mogen rijden wel criteria voor de uitscheermaat U opgenomen.

het maatgevende ontwerpvoertuig het gevolg is, levert dan ook geen beperking op voor de berijdbaarheid.

Figuur D.4-3 *Maatgevend voertuig voor rijbaan rotondes*



In Tabel D.4.1 en Tabel D.4.2 worden de in Nederland aanbevolen rotondebaanbreedtes vergeleken met de bestreken baan van het voertuig van Figuur D.4-3. Duidelijk is, dat de maatvoering voor rotondes samenhang vertoont met de bestreken baan van deze trekker-opleggercombinatie, zonder toepassing van marges.

Tabel D.4.1 *Kenmerken in de praktijk veelvuldig voorkomende trekker-opleggercombinaties*

		Wielbasis oplegger WO = 7,80 m			
		WT 3,40 m	WT 3,70 m	WT 3,40 m	WT 3,70 m
Type rotondebaan	Binnen- straal	Bestreken baan		Bijbehorende buitenstraal	
Enkelstrooksrotonde	12,75	5,14	5,25	17,89	18,00
Enkelstrooksrotonde	13,50	5,02	5,13	18,52	18,63
Enkelstrooksrotonde	15,00	4,82	4,93	19,82	19,93
Binnenbaan turborotonde:	12,00	5,26	5,37	17,26	17,37
Buitenbaan turborotonde:	17,45	4,55	4,65	22,00	22,10

Tabel D.4.2 *In de praktijk toegepaste maatvoering rotonderijbanen*

	Binnenstraal	Rotondebaan	Buitenstraal
Enkelstrooksrotonde	12,75	5,25 m	18,00
Enkelstrooksrotonde	13,50	5,20 m	18,70
Enkelstrooksrotonde	15,00	5,00 m	20,00
Binnenbaan turborotonde:	12,00	5,30 — 5,15 m	17,30 (-0,15)
Buitenbaan turborotonde:	17,45	5,00 m	22,45

N.B. Enkelstrooks cf. Figuur D.3-5

D.4.3. Overrijdbaar verhoogde stroken (rammelstroken)

De overrijdbaar verhoogde stroken op de moderne rotonde rond het middeneiland en de rotondeoksels hebben tot doel grotere voertuigen te faciliteren. Over de hiervoor te hanteren maatvoering bestaan geen officiële internationale afspraken. In Nederland kunnen de ontwikkelingen sinds 2000 ten aanzien van het toestaan van de zogenoemde Lange en/of Zwaardere Voertuigen (LZV's) wel als leidinggevend worden beschouwd. In de *Beleidsregel ervaringsfase ontheffingverlening LZV 2009* (RDW, 2009) zijn eisen vastgelegd waaraan deze voertuigen moeten voldoen. Behalve de maximale lengte van 25,25 meter zijn ook eisen ten aanzien van de bestreken baan geformuleerd. In *Artikel 14, Bijlage F, 2 Algemene*

voorschriften, Artikel H Draaicirkel LZV is bepaald, dat een LZV moet kunnen draaien op een cirkel met een buitenstraal van 14,5 m en een binnenstraal van 6,5 m. Het is praktisch om hiervan uit te gaan, aangezien dit globaal²⁷ overeenkomt met de eisen die de RDW stelt aan een trekker-opleggercombinatie met een combinatielengte CL tussen de 20 en 23 m (zie voetnoot 19).



Figuur D.4-4 LZV-combinaties en hun maatgevende bestreken baan
(ontleend aan G.L. Bordewijk, RDW, Symposium 'Voertuigafmetingen', 3 juni 2008)

NB: In de *Regeling voertuigen* (V&W, 2009a) is in artikel 5.18.13 bepaald, dat op de openbare weg zonder ontheffing moeten worden toegelaten:

- rijdende werktuigen met een maximale lengte van 20 meter;
- samenstellen van kermis- en circusvoertuigen met een maximale lengte van 24 meter (maximale lengte van aanhangwagen 14 meter en oplegger 12,50 m);
- trekker-opleggercombinaties met een maximale lengte van 22 meter ten behoeve van een ondeelbare lading en een ladingbreedte van maximaal 3 meter;
- vrachtauto-aanhangwagencombinaties ten behoeve van autotransport met een lengte van 20,75 meter, die overigens wel moeten voldoen aan de eisen voor een bestreken baan van $\leq 12,50$ en $\geq 5,30$ m.

Voor zover eisen ten aanzien van de bestreken baan vanuit historische overwegingen aan deze groep voertuigen ontbreken, is het te verdedigen dat wegbeheerders ervan uitgaan, dat de bestreken baan van de wielen niet afwijkt van de voertuigen die dienen te voldoen aan de draairoefseisen voor een samenstel met een lengte 20-23 m. De voertuigcombinatie van 22 m bijvoorbeeld voldoet hieraan als de wielbasis $WO = 9,55$ m is. Wel is de afstand tussen de achteras oplegger en de achterkant lading dan groot (7,90 m), zodat met een grote uitscheermaat (U) rekening gehouden moet worden als het om een voertuig zonder meesturende achteras gaat. Een voldoende grote obstakelvrije ruimte is dan ook niet zonder belang.

De marge van 1,00 m ter weerszijden van de op deze wijze berekende bestreken baan is ontleend aan de Britse rotonderichtlijn *Geometric Design of Roundabouts* (DTF, 2007).

²⁷ Het verschil betreft alleen de hoek die in de draairoeven moet worden doorreden: 3600 door LZV's en 1200 door voertuigen waarvoor geldt: $20,00 \text{ m} < CL \leq 23,00 \text{ m}$.

In Duitsland worden strengere eisen gesteld: voor de lengteklassen boven de 20 m worden de eisen voor de bestreken baan steeds gedefinieerd bij eenzelfde, kleinere, buitencirkelstraal van 14 m: 7,5 m voor $>20-23$ m, 8,0 m voor $>23-25$ m en 9,0 m voor $>25-27$ m (Ostheimer, 2006, p.53).

D.4.4. Breedte draagkrachtige bermstrook in rotondeoksels

Voor het verlenen van ontheffingen voor exceptioneel transport $> 23 - 27$ m geldt de eis, dat de bestreken baan moet voldoen aan $R_{\text{buiten}} = 16,50$ m met $R_{\text{binnen}} \geq 7,50$ m. Deze 9 m brede baan²² (+2 m, i.v.m. een speling van 1 m aan weerszijden) kan de basis vormen voor de minimum eis voor de draagkrachtige berm in de oksels²⁸.

Deze baan is ook maatgevend voor de minimum afstand van verticale obstakels.

Voor het verlenen van ontheffingen voor exceptioneel transport langer dan 27 meter en breder dan 3,5 meter worden geen algemeen geldende grenswaarden gesteld. Daarvoor zijn dergelijke transporten te divers. Wel is aan deze ontheffingen een begeleidings- en routeplicht gekoppeld. Op routes waar bepaalde exceptionele transporten veelvuldig voorkomen, dient bij het ontwerp van rotondes rekening te worden gehouden met de rij-eigenschappen van deze voertuigen. Enerzijds kan dat gebeuren door het creëren van (al dan niet afsluitbare) doorsteken, waar exceptionele transporten alleen met hoogteverschillen van 7 cm worden geconfronteerd. Anderzijds is voor dit type transporten een draagkrachtige berm zonder obstakels van groot belang.



Figuur D.4-5 *Exceptioneel transport met ontheffing en begeleiding*
(transport voorgespannen betonnen balken via turborotonde N 459/A12-noord)

D.4.5. Bepaling bestreken baan

Formule²⁹

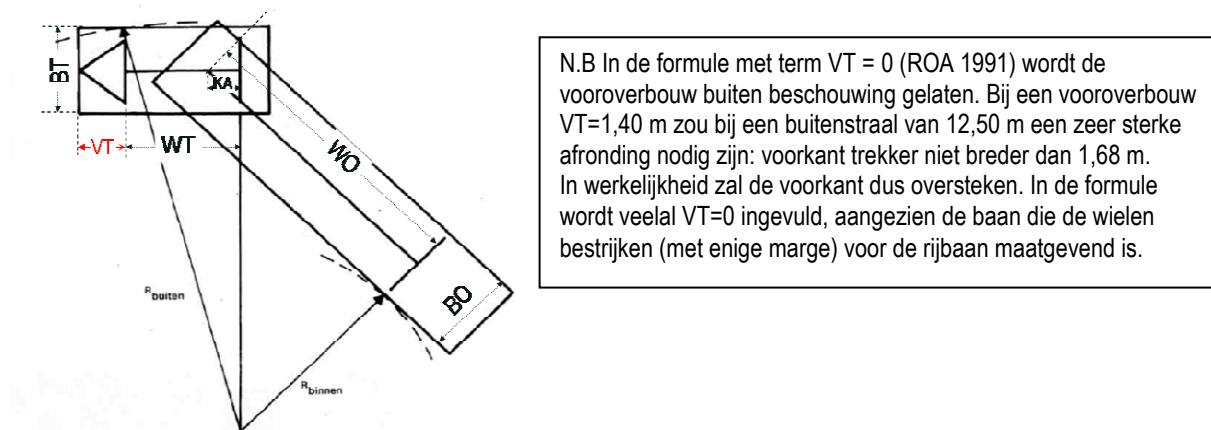
In een boog geldt (onder de aanname dat de boog zonder wielslip wordt doorreden) voor een trekker met oplegger (met starre achteras):

$$R_{\text{buiten}} = \sqrt{\left\langle \left[\sqrt{\left\{ \left(R_{\text{binnen}} + \frac{1}{2} BO \right)^2 + (WO + KA)^2 - KA^2 \right\} + \frac{1}{2} BT} \right]^2 + (WT + VT)^2 \right\rangle} \quad (\text{d.6})$$

Grafisch wordt deze formule toegelicht in Figuur D.4-6.

²⁸ In de ontwerppraktijk gebruiken Auto TURNgebruikers hiervoor de bestreken baan van de Australische semi-trailer van 25 m lengte (AUSTROADS 2004, SEMI-TRAILER 25 M).

²⁹ De formule op blz. 95 van publicatie 164c bevat een fout. $(WO+KA^2)$ moet zijn: $(WO+KA)^2$. Verder wordt daarin ervan uitgegaan dat de trekker aan de voorkant niet is afgerond. Vandaar dat de term VT is toegevoegd.



Figuur D.4-6 Toelichting symbolen formule bestreken baan
(bron: ROA-Alignement, 1991, Bijlage 6.2)

Mogelijke voertuigcombinaties die wel aan de EU-maatvoering maar niet aan de EU-bestreken baan voldoen

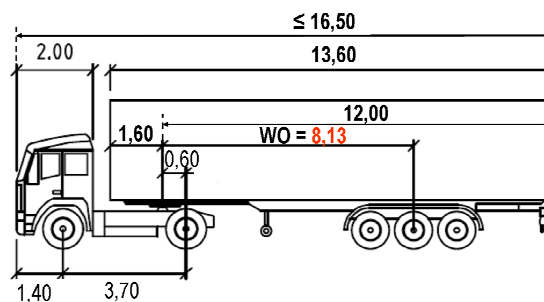
Artikel 7.6.1.2 van Bijlage 1 Richtlijn 97/27/EG laat volgens formule (d.5) een trekker-opleggercombinatie toe, die bij een breedte van 2,55 m een afstand tussen oplegpen en achteras ('wielbasis' WO) van 8,13 m heeft.

Tabel D.4.3 Kenmerken wettelijk mogelijke combinaties trekker-oplegger

Trekker	Oplegger
Breedte: 2,55 m (=BT)	Breedte: 2,55 m (=BO)
Wielbasis: 3,70 m (=WT)	Wielbasis: 8,13m (=WO)
Vooroverbouw: 1,40 (in formule $VT = 0$)	Lengte pen-achterkant: 12,00m
Koppingsafstand: 0,60 (=KA)	Achteroverbouw: 3,87 m

In Figuur D.4-7 is deze trekker-opleggercombinatie getekend. Als van deze voertuigcombinatie de bestreken baan wordt bepaald, blijkt dat bij een binnenstraal van 5,30 m de buitenstraal 12,74 m bedraagt. Hiermee is de bestreken baan 7,44 m. Deze overschrijdt met 24 cm de wettelijk toegestane breedte van de bestreken baan. Als van een buitenstraal van 12,50 m wordt uitgegaan, bedraagt de binnenstraal 4,90 m³⁰. Dat is een 40 cm bredere bestreken baan. Vermoed mag worden, dat dit bij de opstellers van de Europese richtlijnen bekend was.³¹

Figuur D.4-7 Trekker-opleggercombinatie die voldoet aan Europese oplegger-norm, maar niet aan die van de bestreken baan



³⁰ Hierbij is het overstekende deel van de voorzijde van de trekker buiten beschouwing gelaten.

³¹ Artikel 7.6.1.2 van Bijlage 1 Richtlijn 97/27/EG is als volgt geformuleerd: Een oplegger wordt *geacht te voldoen* aan de eisen van punt 7.6.1.....(Cursivering van auteur.)

Overigens komt het voor een buitenstaander wat merkwaardig over, dat opleggers met de maximale lengte- en breedtematen volgens de Europese regelgeving (nog steeds) worden goedgekeurd, zonder aanvullende eisen ten aanzien van een meesturende achteras, of beperkende bepalingen met betrekking tot de maatvoering van het trekkende voertuig. Hierin moeten wegbeheerders nu hun eigen weg vinden. In D.4.1 is daarvoor een voorstel gedaan met het oog op het ontwerpen van rotondes.

Bestreken baan Ontwerpvoertuig ‘Handboek wegontwerp –Basiscriteria’

Wanneer in formule (d.6) de maten worden ingevuld van het voertuig dat in paragraaf 5.5.5 van CROW-publicatie 164a ‘Handboek Wegontwerp –Basiscriteria’(2002a) als maatgevende trekker met oplegger wordt genoemd, blijkt, dat bij een binnenstraal van 5,30 m, de buitenstraal 14,31 m zou bedragen. Hiermee overschrijdt dit voertuig met starre achteras met 1,77 m de Europese eisen voor de breedte van de bestreken baan.

Bestreken baan Ontwerpvoertuig ‘Handboek wegontwerp –Gebiedsontsluitingswegen’

Wanneer in formule (d.6) de maten worden ingevuld van het voertuig uit paragraaf 7.3.5 van CROW-publicatie 164c ‘Handboek wegontwerp –Gebiedsontsluitingswegen’(2002c), blijkt ook dit voertuig niet strikt aan de wettelijke eisen voor de bestreken baan te voldoen. Bij $R_{\text{binnen}} = 5,30$ m bedraagt $R_{\text{buiten}} = 12,55$ m en niet 12,50 m zoals wettelijk is voorgeschreven. De oorzaak hiervan is, dat met de wijziging van de Wegenverkeerswet in 1994 de wettelijk toegestane breedte van 2,50 m is vergroot tot 2,55 m. Overigens is in de praktijk een trekker nooit breder dan 2,50 m. En bij een trekkerbreedte van 2,45 m voldoet deze trekker-opleggercombinatie wel aan de Europese norm.

Dit gegeven verklaart overigens ook, waarom dit voertuig ‘veel toegepaste maten’ heeft: met een breedte van 2,50 m (of trekkerbreedte van 2,45 m en opleggerbreedte van 2,55 m) heeft deze combinatie een bestreken baan, die overeenkomt met de Europese norm.

Mogelijke voertuigcombinatie te gebruiken voor het ontwerp van de overrijdbaar verhoogde stroken

Voor het dimensioneren van de rammelstroken is de voertuigcombinatie van Tabel D.4.4 bruikbaar.

Tabel D.4.4 Kenmerken te hanteren 22 m-trekker-opleggercombinatie

Trekker	Oplegger
Breedte: 2,45 m (=BT)	Breedte: 2,55 m (=BO)
Wielbasis: 3,70 m (=WT)	Wielbasis: 9,55 m (=WO)
Vooroverbouw: 1,45 (in formule $VT=0$)	Lengte pen–achterkant lading: 17,45 m
Koppelingsafstand: 0,60 (=KA)	‘Achteroverbouw’: achteras-achterkant lading: 7,90 m

D.5. Rammelstrookband

Gelet op het bovenstaande vormt een goed ontwerp van de overgang van de rijbaan naar de rammelstrook een uitdaging. Een rammelstrookband dient zo te zijn vormgegeven dat:

- deze door personenauto's wordt gemedend;
- deze door vrachtauto's zonder bezwaar kan worden bereden;
- de kans op beschadiging door diepladers wordt geminimaliseerd en

- het omslaan van vrachtwagens ook zo klein mogelijk is.

Dat vergt een goed afgestemde verhouding tussen de hoogte van de band en de toe te passen hellingen.

Benadering

De obstakelwerking van een (abrupt) hoogteverschil onder de 7 cm is verwaarloosbaar klein. Voor de bodemvrije hoogte worden in de wet geen maten aangegeven. In de praktijk wordt voor diepladers een hoogte van 12 cm in onbelaste toestand en van 10 cm in belaste toestand aangehouden. Bij wet zijn eisen voor opleggers vastgelegd. De afstand tussen de achteras en het draaipunt van de oplegger mag 8,135 m bedragen, als de breedte 2,55 m is. Bij diepladers gaat het echter veelal om buitenwettelijke voertuigen. Daarom wordt gerekend met een fictieve afstand van 10 m tussen de achterwielen van de dieplader en die van de trekker. Uit het voorgaande volgt dat de dieplader zich ca. 1 m over de rand van de rammelstrook (inclusief rammelstrookband) kan bevinden, terwijl de wielen zich nog juist op de rijbaan bevinden. Wanneer het afschot van de rijbaan 2 à 2,5 % bedraagt, resulteert dit over 1 m in een 'hoogteverlies' van ca. 2 cm onder de bodem van de dieplader (op 1 m van de zijkant).

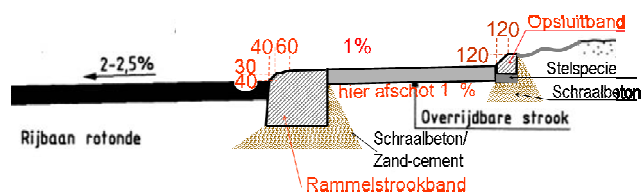
Functionele eisen rammelstrookband

Overleg met verschillende deskundigen leidt tot het inzicht van de volgende eisen:

- de banden van de vrachtwagenwielen ondervinden bij het oprijden van een schuine rand minder wrijving dan van een ronde rand;
- ter beperking van schaderijdingen dient de hoogte van de rammelstrookband beperkt te blijven tot ca. 7,5 cm;
- ter beperking van de schadegevoeligheid van de rammelstrookband verdient het aanbeveling om aan de rijwegkant geen scherpe hoeken toe te passen;
- in verband met beschadigingen bij het aanbrengen verdient het aanbeveling aan de rammelstrookkant een vellingkant toe te passen.

Vorm rammelstrookband

Deze functionele eisen hebben geleid tot een nieuw ontwerp voor de rammelstrookband. De bodemvrijheid in het midden van de dieplader boven deze band is ca. 1 cm (bij een standaard bodemvrijheid van $12 - 2 = 10$ cm in beladen toestand). Deze band is nu als standaard opgenomen in CROW-257, 2008, figuur 34.



Figuur D.5-1 Dwarsdoorsnede rammelstrook CROW 126 met correctie (opgenomen in CROW 257)



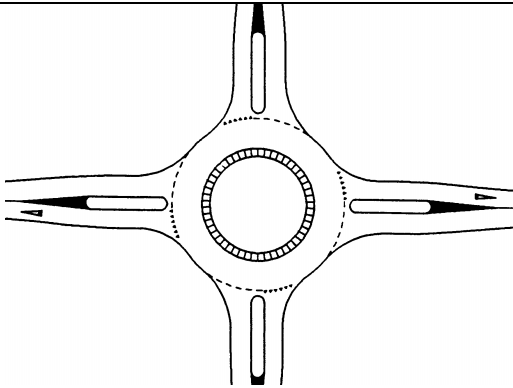
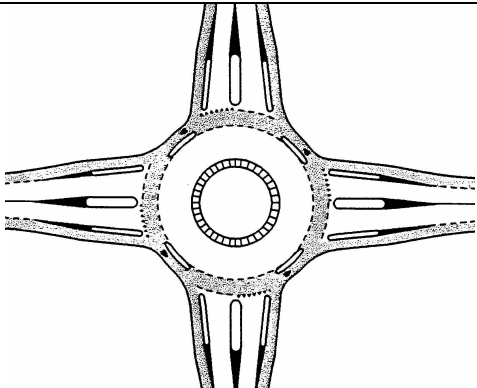
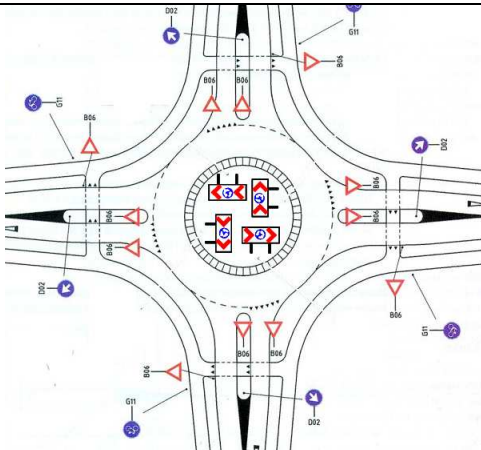
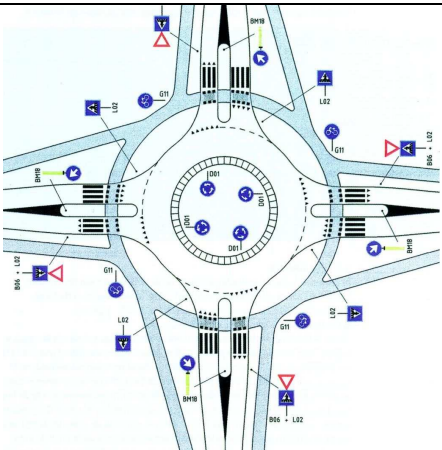
Figuur D.5-2 Foto rammelstrookband

D.6. Fietsvoorzieningen op rotondes

D.6.1. Alternatieven fietsvoorzieningen

Gebaseerd op het Nederlandse ontwerp van de enkelstrooksrotonde zijn in principe vier typen fietsvoorzieningen op rotondes te onderscheiden:

- fietsverkeer gemengd met het overige verkeer (Figuur D.6-1);
- fietsstrook aanliggend aan de rotondebaan (Figuur D.6-2);
- vrijliggend fietspad dat met de aan- en afvoertakken meebuigt en fietsoversteken waarop (brom)fietzers uit de voorrang zijn (Figuur D.6-3);
- vrijliggend fietspad dat op 5 m afstand parallel loopt met de rotondebaan en fietsers in de voorrang (Figuur D.6-4).

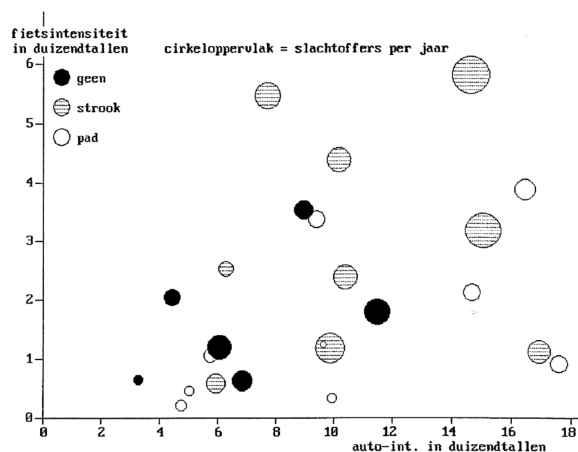
	
Figuur D.6-1 <i>Rotonde met fietsverkeer gemengd met het overige verkeer</i>	Figuur D.6-2 <i>Rotonde met aanliggende fietsstrook</i>
	
Figuur D.6-3 <i>Rotonde met vrij liggend fietspad uit de voorrang</i>	Figuur D.6-4 <i>Rotonde met vrij liggend fietspad in de voorrang</i>

Opmerking: de haaiantanden zijn voor het herkennen van de noodzaak om voorrang te verlenen belangrijker dan de borden.

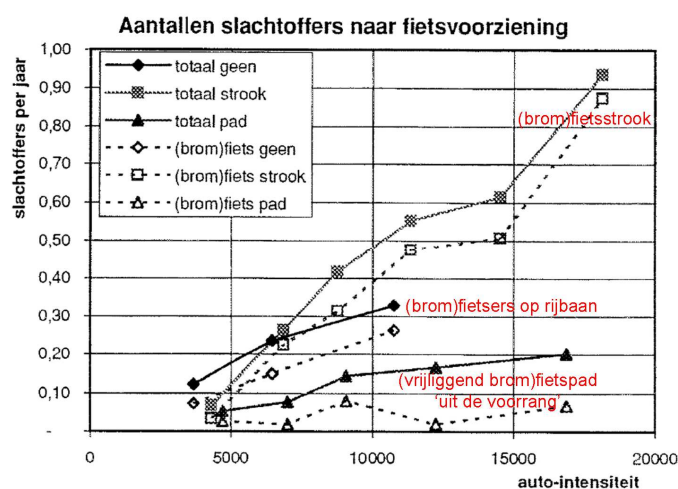
Het verschil in herkenning van de voorrangssituatie tussen de varianten van Figuur D.6-3 en Figuur D.6-4 is door TNO onderzocht (Brouwer, & Brouwer, 2001)

D.6.2. Veiligheid fietsvoorzieningen

Van Minnen (1995) heeft onderzoek gedaan naar de fietsveiligheid van de eerste drie onder D.6.1 genoemde oplossingen. Daarin zijn zowel de ongevallen als de slachtoffers gerelateerd aan de auto-intensiteit en de fiets-intensiteit (Figuur D.6-5). De relatie tussen ongevallen en de auto-intensiteiten bleek bijna lineair te zijn. Verder bleek vooral het type fietsvoorziening van invloed te zijn op de aantallen slachtoffers (Figuur D.6-6). Op grond van dit onderzoek worden fietsstroken op rotondes in Nederland niet meer aanbevolen. (CROW-126, 1998).



Figuur D.6-5 Aantallen slachtoffers gerelateerd aan zowel auto- als (brom)fietsintensiteiten (Van Minnen, 1995)



Figuur D.6-6 Aantallen slachtoffers per pleinjaar als functie van de auto-intensiteit (Van Minnen, 1995)

In genoemd onderzoek was het ook mogelijk om van 178 rotondes de voor- en nasituatie te vergelijken (Tabel D.6.1). Opmerkelijk is de sterke afname van het aantal slachtoffers in de groep rotondes voorzien van een vrij liggend fietspad uit de voorrang (aantal: 8 + 49, geel gemarkeerd). Eenzelfde beeld laat een voor en na vergelijking zien uitgevoerd door de provincie Zuid-Holland³².

³² Bron: presentatie bijdrage 'Pedestrian and Bicycle-Friendly Roundabouts; Dilemma of Comfort and Safety', Annual Meeting ITE in Seattle 2003 (Fortuijn, 2003f). Niet in die publicatie zelf opgenomen.

Tabel D.6.1 Verhouding na- / voorperiode van fietsvoorzieningen (Van Minnen, 1995)

Fietsvoorziening		Aantal locaties	Verhouding na- / voorperiode		
Kruispunt (voor-periode)	Ronde (na-periode)		Ongevallen	Slachtoffers	
				totaal	(brom)fiets
Geen fietsvoorziening	Geen	15	0,53	0,29	0,50
	Strook	35	0,40	0,27	0,46
	Pad	8	0,39	0,09	0,00
Fietsstrook	Strook	20	0,44	0,40	0,69
Fietspad	Geen	3	0,67	0,73	0,87
	Strook	48	0,44	0,33	0,61
	Pad	49	0,44	0,09	0,11
Totaal		178	178	0,24	0,45

Tabel D.6.2 Reductie van alle slachtofferongevallen en die onder (brom)fietsers

27 locaties op provinciale wegen in Zuid-Holland: 3 jaar voorsituatie en 3 jaar nasituatie van rotondes aangelegd in de periode 1989-1999	Slachtofferongevallen op locaties die zijn vervangen door een rotonde op provinciale wegen van Zuid-Holland			
	Kruispunt (voor-periode)	Rotonde (na-periode)	Afname percentage	Significantie
Totaal slachtofferongevallen	144	28	-81%	Zeep sterk
Ongevallen met (brom)fietsersslachtoffers	47	8	-83%	Zeep sterk

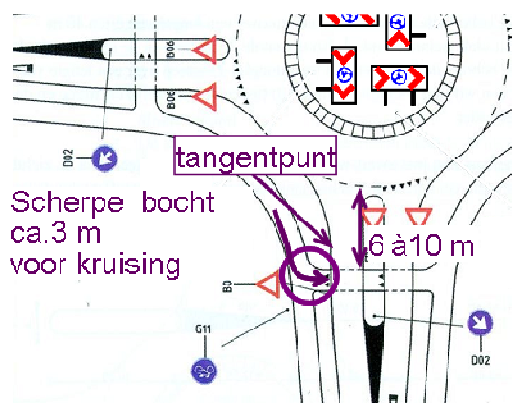
Opgemerkt moet worden dat het in beide gevallen rotondes betreft die in de eerste tien jaar zijn aangelegd op relatief gevaarlijk kruispunten. Ook zijn de cijfers van Tabel D.6.1 en Tabel D.6.2 niet gecorrigeerd voor de algemene veiligheidsontwikkeling en 'regressie naar het gemiddelde' (toevallige verhogingen van het aantal ongevallen, waarna wegbeheerders maatregelen treffen, zie hoofdstuk 6.2). Niettegenstaande deze beperking is een afname van het aantal slachtoffers onder (brom)fietsers die globaal overeenkomt met de afname van letselongevallen onder alle verkeersdeelnemers opvallend, gelet op resultaten in andere landen (Arndt & Troutbeck, 1995; Daniels et al., 2009)³³. Kenmerken die naast de snelheidsreductie van het rotondeverkeer mogelijk bepalend zijn voor het veilige karakter van deze oplossing voor (brom)fietsers zijn weergegeven in Figuur D.6-7.

Sinds 1991 zijn in Nederland rotondes gerealiseerd met fietspaden, waarop fietsers voorrang hebben op het autoverkeer (Van Minnen, 1995, p.20). Zie Figuur D.6-4. Door de SWOV is uitgebreid onderzoek gedaan naar de veiligheid van deze voorziening, samengevat door Dijkstra (2004). Zie Tabel D.6.3. De uitkomsten wijzen sterk in de richting, dat de oplossing met fietsers in de voorrang vooral voor deze groep verkeersdeelnemers onveilig is³⁴.

³³ Arndt en Troutbeck stelden: "Numerous studiesshow that roundabouts are a safer intersection type for vehicle occupants and pedestrians, but may be more dangerous for cyclists." En Daniels concludeert dat resultaten doen vermoeden dat rotondes een toename van het aantal dodelijk en ernstig gewonde fietsers tot gevolg hebben.

³⁴ Een beperking van deze studie in onderzoekstechnisch opzicht is, dat het hier niet om een echte voor-en-na vergelijking gaat: de data voor de fietsslachtoffers in de voorsituatie zijn via benaderingen tot stand gekomen. Wellicht dat uitbreiding met rotonde- en slachtofferkenmerken van de dataset die is gebruikt in de studie Churchill et al. (2010), aan dit bezwaar tegemoet kan komen.

Figuur D.6-7 Detailkenmerken fietsoversteek uit de voorrang³⁵



Drie functies scherpe bocht:

- reduceren snelheid (brom)fietzers
- onderstrepen verlies van recht op voorrang door afslagbeweging
- tijdsruimte bieden om goed waar te nemen

Tabel D.6.3 Ziekenhuisgewonden op kruispunten en rotondes met fietsers in en uit de voorrang

Situatie c.q. voorrangs-regeling	Aantal kruispunten c.q. rotondes	Kruispunt-c.q. rotonde-jaren	Ziekenhuis gewonden alle verkeersdeelnemers		Ziekenhuis gewonden (brom)fietsers	
			Aantal	Aantal / puntjaar	Aantal	Aantal / puntjaar
Kruispunt	177	940	354	0,376	115 ^{*)}	0,122 ^{*)}
Rotondes met fietsers uit de voorrang ³⁶	36	252	14	0,056	4	0,016
Rotondes met fietsers in de voorrang ³⁷	22	110	19	0,171	12	0,109

^{*)} Via kengetallen voor situaties binnen de bebouwde kom berekend.

Steyvers (1999) heeft erop gewezen dat dit samenhangt met de taakbelasting van automobilisten die over een rotonde rijden en deze gaan verlaten: de stuurtaak eist zodanig de aandacht op, dat er te weinig mentale ruimte overblijft om voldoende aandacht te schenken aan fietsers die vanaf het fietspad de afvoertak gaan kruisen. Maar ook bij het oprijden van de rotonde doen zich problemen voor. Räsänen and Summala (2000) stellen dat ongevallen tussen oprijdende auto's en fietsers in de voorrang het meest frequent voorkomen: vanaf de naderingstak zien automobilisten fietsers over het hoofd, doordat het iets verderop gelegen conflictpunt (rotondebahn voor het autoverkeer) te zeer de aandacht opeist³⁸.

³⁵ Uit een onderzoek naar eenzijdige fietsongevallen (Schepers en Brinkers, 2011) blijkt dat de zichtbaarheid van de kant van het fietspad essentieel is voor het reduceren van het hoge aantal (veelal niet geregistreerde) letselongevallen onder fietsers. Een witte kantmarkering op het fietspad is daarvoor belangrijk. Deze voorziening is thans nog niet opgenomen in de richtlijnen.

³⁶ Ontleend aan de studie van Weijermars (2001).

³⁷ Ontleend aan de studie van Gerts (2002).

De effecten van de aanleg van beide typen rotondes op het aantal slachtofferongevallen op grond van o.a. beide studies zijn verkend in 'Vorrangsregeling fietsers op rotondes; overzicht van gegevens uit Nederlandse studies sinds 2000' (Fortuijn, 200b).

³⁸ Dat automobilisten bij het oprijden van een rotonde fietsers over het hoofd zien is geen uitzondering. In een Deense studie (Brude & Larson, 1996) was dit ook de belangrijkste ongevalcategorie. De auteurs merken op, dat autobestuurders bij het oprijden van de rotonde vooral uitkijken naar auto's en daardoor fietsers missen (geciteerd bij Weijermars).

D.6.3. Fietsvoorzieningen op turborotondes

Fietschicane

Een fietsoversteek over een dubbele rijstrook (per richting) betekent in vergelijking met een oversteek over een enkele rijstrook (eveneens per richting) een hogere taakbelasting. Twee factoren moeten verantwoordelijk worden gehouden voor een hoger risico:

- de hogere snelheden van het autoverkeer (zie Figuur 3.3-3)
- het grotere zichtveld waarin de conflicterende tegenpartijen uit verschillende richtingen zich bevinden.

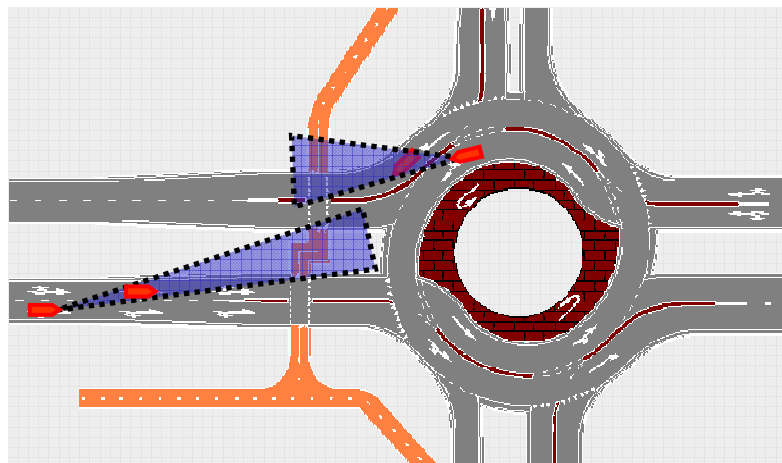
Daarom behoren in nieuwe situaties fietstunnels deel uit te maken van het pakket van functionele eisen. Toch zijn er veel plaatsen waar dat in bestaande situaties niet tegen aanvaardbare maatschappelijke kosten te realiseren is. Dan is een fietsoversteek op een plaats waar het gemotoriseerde verkeer met lagere snelheid rijdt te verkiezen boven een oversteek op een wegvak. Voor de fietser is het ook van belang dat de waarneem- en beslistijd tussen die twee oversteeken boven de twee seconden ligt. Ook is van belang dat de fietser zo voor de tweede oversteek wordt gepositioneerd, dat deze het autoverkeer goed in beeld heeft. Om dat te bereiken kunnen deze fietsoversteeken van een *chicane* worden voorzien (Figuur D.6-8).



Figuur D.6-8 *Fietschicane bij turborotondes*

D.6.4. Afdekproblematiek bij dubbelstrooksoversteek

Bij het oversteken van dubbele rijstroken treedt een afdekprobleem op. Als een fietser voorrang heeft, kan een auto naast de autobestuurder het zicht op de fietser afdekken. Deze negatieve consequentie treedt niet op als de fietser voorrang moet verlenen. Immers, de fietser moet dan toch al stoppen voor de auto die hij ziet. En stopt daarmee ook voor de auto die niet wordt gezien.



Figuur D.6-9 *Afdekproblematiek bij dubbelstrooks fietsoversteek*

D.6.5. Conclusie voorrangsregeling fietsoversteken turborotondes

Het is voor de veiligheid op turborotondes dan ook van groot belang, dat alle fietsoversteken buiten de voorrang worden gehouden. Hiervoor zijn drie redenen aan te voeren, die elkaar versterken:

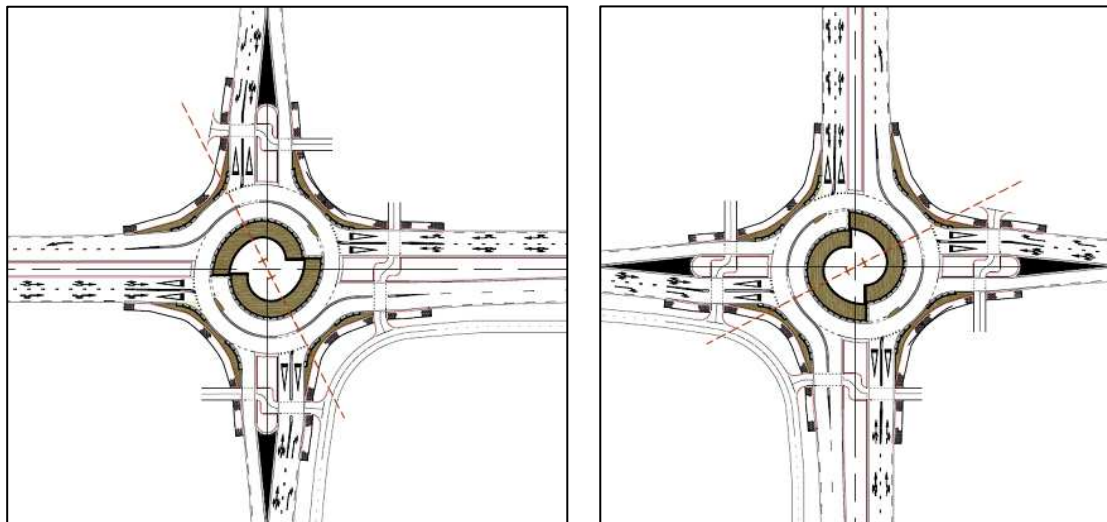
- sowieso is de kans op ziekenhuisletsel op enkelstrooksrotondes met fietsers in voorrang zevenmaal hoger dan op rotondes met fietsers uit de voorrang;
- bij een dubbele oversteek kan bij nadering van de rotonde bij fietsers in de voorrang een gevaarlijk afdekprobleem optreden;
- daarbij komt dat het gemotoriseerde verkeer bij het verlaten van de turborotonde op de rechterrijstrook van de hoofdtak de fietsoversteek volstrekt niet als parallel aan de doorgaande rijbaan kan herkennen.

Bijlage E. Ontwerp turboblockvarianten

E.1. Rijbaanbreedte en rijstrookbreedte

Buiten de bebouwde kom wordt de weginfrastructuur ontworpen vanuit de belijning. Daarvoor is de rijstrookbreedte (tussen de twee binnenkanten van de kantmarkering) bepalend. Omdat de kantstroken niet overal even breed zijn, wordt voor de bepaling van de benodigde bochtverbreding uitgegaan van de rijbaanbreedte (gedefinieerd tussen de kanten asfalt). Bij de dimensionering van de turboblocken van de verschillende typen rotondes dient dat in ogenschouw genomen te worden. Hierna wordt dat voor verschillende rotondevormen nader toegelicht.

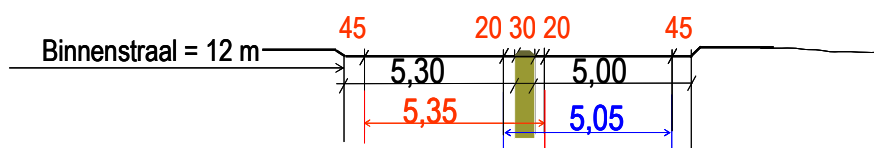
E.2. Ontwerpmethodiek basis turborotonde



Figuur E.2-1 Basisvorm turborotonde

E.2.1. Bepaling rijbaanbreedten basis turborotonde

Voor het ontwerp van de basis turborotonde is één translatie-as nodig (Figuur E.2-1, waarin de turborotonde ook 90° is gedraaid). Het verspringen van de middelpunten wordt bepaald door het opschuiven van de lijnmarkering.



Figuur E.2-2 Schema opschuiven lijnmarkering op de turborotonde

De binnenkant van de binnenste rijbaan heeft een straal $R_1 = 12$ m. Op een enkelstrooksrotonde hoort daarbij een baanbreedte van 5,35 m. De aanwezigheid van overrijdbaar verhoogde baanscheidingen maakt het mogelijk de benodigde rijbaanbreedte voor een turborotonde naar beneden af te ronden. In verband met de wens tot beperking van de doorrijnsnelheid wordt gekozen voor een (fictieve) startbreedte van 5,30 m.

Op een turborotonde schuift de rotondebahn over een half segment één rijbaan op, inclusief de breedte van de scheidingsband. De binnenstraal van de buitenste rotondebahn is dan bij benadering 17,60 m (afgezien van een eventuele correctie t.b.v. het breedteverloop van de binnenste rotondebahn, zie verderop). Hoewel de bestreken baan van het ontwerpvoertuig dan slechts 4,65 m breed is, wordt toch op grond van voertuigsimulaties voor een rijbaanbreedte van de buitenbaan van 5 m gekozen. Uiteraard kan een dergelijke beslissing niet in één keer worden genomen; daarvoor is een iteratief ontwerpproces nodig.

E.2.2. Verloop kantmarkering

De afstand van de binnenkant van de markering tot de rammelstroken bedraagt 45 cm en die tot de overrijdbaar verhoogde rijbaanscheiding 20 cm. Figuur E.2-2 laat zien dat de linker markeringslijn van de binnenste rotondestrook dan over 5,35 m verschuift en de rechter markeringslijn over 5,05 m. Het verloop van de rijstrookbreedte (tussen de kantlijnen) bedraagt dus 30 cm, evenals het breedteverloop van de rijbanen.

De keuze of de binnenste rijbaan of de buitenste rijbaan in breedte verloopt, bepaalt hoe het verspringen van de middelpunten wordt uitgevoerd. In Figuur E.2-1 is duidelijk dat de binnenste rotondebahn over de gehele lengte steeds aan het overrijdbare deel van het middeneiland grenst. Verderop wordt de buitenste rotondebahn aan de rechterzijde door een overrijdbare strook begrensd. Duidelijk is, dat grote voertuigen altijd aan één kant een overrijdbaar verhoogde strook (= extra baandeel) tot hun beschikking hebben. Bij een turborotonde wordt er dan ook meestal voor gekozen om het breedteverloop al op de binnenste rotondestrook te doen plaatsvinden, zodat de breedte van de binnenste rotondebahn aan het eind 5 m bedraagt.

E.2.3. Ontwerp turboblock

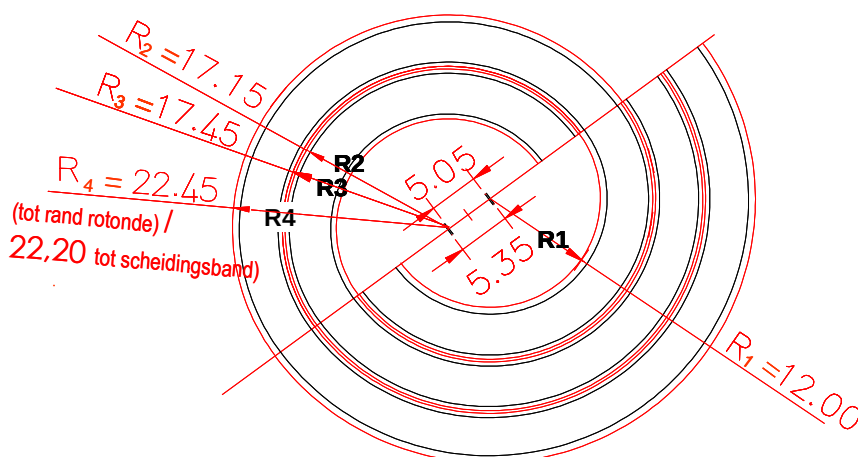
Voor de uitleg van de opbouw van het turboblock wordt gestart met binnenste stralen $R_1 = 12$ m. De middelpunten daarvan liggen op de buitenste middelpunten, op 5,35 m afstand van elkaar. De stralen van de binnenste kant lijn $R'_1 = 12,45$ m hebben dezelfde middelpunten. Na een half rotondesegment gaat deze over in de straal van de linker kantlijn van de buitenste rotondebahn. De rijstrook van de binnenste rotondebahn is op het startpunt $5,35 - 0,70 = 4,65$ m breed en aan het eind 4,35 m. Om dat te bereiken wordt het middelpunt van de rechter kantlijn van de binnenste rotondebahn 15 cm naar binnen gelegd, waardoor deze niet $12,45 + 4,65 = 17,10$ m lang, maar $R'_2 = 17,10 - 0,15 = 16,95$ m lang wordt. En de buitenstraal van de binnenste rotondebahn (=binnenstraal 1° segment scheidingsband): $R_2 = 17,15$ m.

De rijstrook van de buitenste rotondebahn heeft een constante breedte van $5,05 - 0,70 = 4,35$ m. De stralen R_2 , R_3 en R_4 hebben alle dezelfde middelpunten: de binnenste punten op de

translatie-as in Figuur E.2-3 en Figuur E.2-4 is:

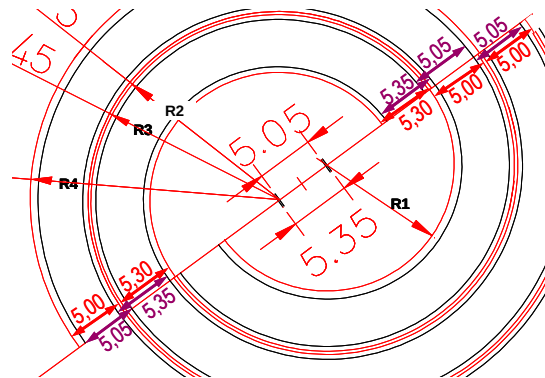
R 1	: binnenkant binnenste rijbaan	=	12,00 m;
R'1	: verkeerskant linker kantstreep binnenste rotondestrook	=	12,45 m;
R'2	: verkeerskant rechter kantstreep binnenste rotondestrook	=	16,95 m;
R 2	: buitenkant binnenste rijbaan = linkerkant scheidingsband	=	17,15 m;
R3a	: eerste deel binnenkant buitenste rijbaan = rand overrijdbare strook middeneiland	=	17,20 m;
R3b	: vervolgdeel binnenkant buitenste rijbaan= rechterkant scheidingband	=	17,45 m;
R'3	: verkeerskant linker kantstreep buitenste rotondestrook	=	17,65 m;
R'4	: verkeerskant rechter kantstreep buitenste rotondestrook	=	22,00 m;
R4a	: buitenkant buitenste rijbaan tot scheidingsband	=	22,20 m;
R4b	: buitenkant buitenste rijbaan	=	22,45 m;
R5	: binnenkant van laatste deel buitenste rijbaan = rechterkant laatste scheidingband	=	22,50 m;
R'5	: verkeerskant linker kantstreep laatste deel buitenste rotondestrook	=	22,70 m;
R'6	: verkeerskant rechter kantstreep laatste deel buitenste rotondestrook	=	27,05 m;
R6	: buitenkant van laatste deel buitenste rijbaan	=	27, 50 m.

Vanwege de opbouw van rotondes met spiraalmarkering (men rijdt van 'binnen' naar 'buiten') worden de stralen van binnen uit genummerd, in tegenstelling tot de wijze van nummeren in CROW-publicatie 126. Bij het feitelijk ontwerpen wordt veelal weer van buiten naar binnen gewerkt, zowel in verband met de beschikbare ruimte als in verband met de ontwerptechniek die nodig is om het breedteverloop van de rotondestroken te realiseren. Hoewel vanuit de ontwerppraktijk een nummering van buiten naar binnen meer voor de hand ligt, is gekozen voor een nummering die vanuit het gezichtspunt van de verkeersdeelnemer logisch is: van binnen naar buiten.



Figuur E.2-3 Turboblock van een turborotonde

In het turboblock van de basis turborotonde verspringen de middelpunten van de binnenste cirkels R1 en R'1 over deze buitenste punten. De overige middelpunten verspringen over de binnenste punten.



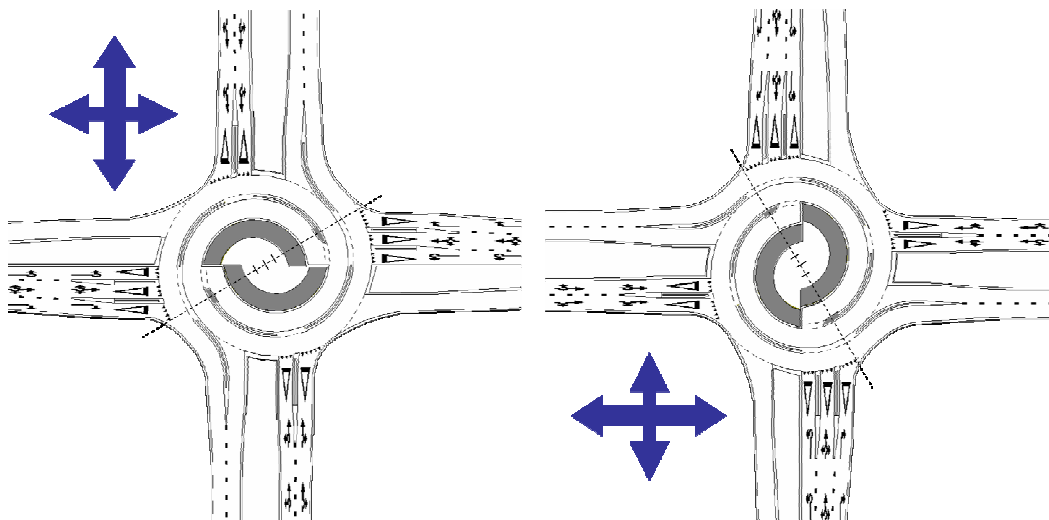
Figuur E.2-4 Detail turboblock
turborotonde

De binnenstraal R1 heeft een buitenste punt op de translaties tot middelpunt. Omdat het breedteverloop van de rijstroken op de binnenste rotondebanen plaatsvindt, hebben de R2 en R3 (binnen- en buitenkant van het eerste deel van de scheidingsband) een binnenste punt tot middelpunt. Hetzelfde geldt voor straal R4 en de stralen R5 en R6 (voor zover van toepassing).

Deze punten vormen het startpunt voor het ontwerp van het ‘turboblock’: de translaties met verspringende middelpunten van de rotondecirkels. Begonnen wordt met het bepalen van de afstand tussen de binnenste punten op de translatie-as. Dat zijn de middelpunten van de buitenste rotondecirkels. De afstand tussen die punten wordt bepaald door de afstand waarover de verkeerskant van de buitenste kantlijn over een halve rotondestrook naar buiten moet verlopen. Uit Figuur E.2-2 blijkt dat dit een afstand van 5,05 m is.

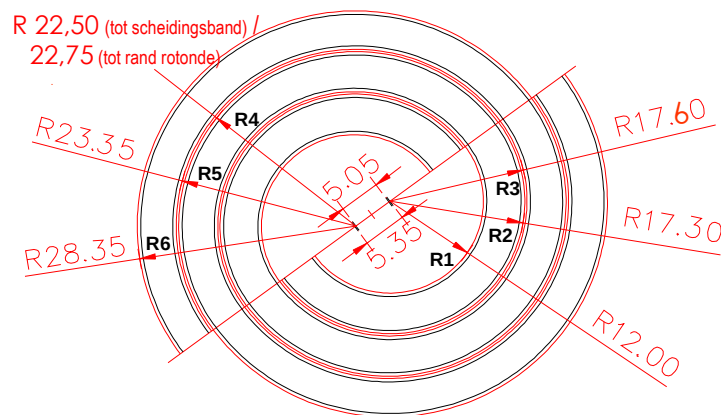
E.3. Turboblock spiraalrotonde

Evenals voor de turborotonde is voor het ontwerpen van een spiraalrotonde één translatie-as nodig (zie Figuur E.3-1



Figuur E.3-1 Principe Spiraalrotonde; links hoofdas oost-west; rechts hoofdas noord-zuid

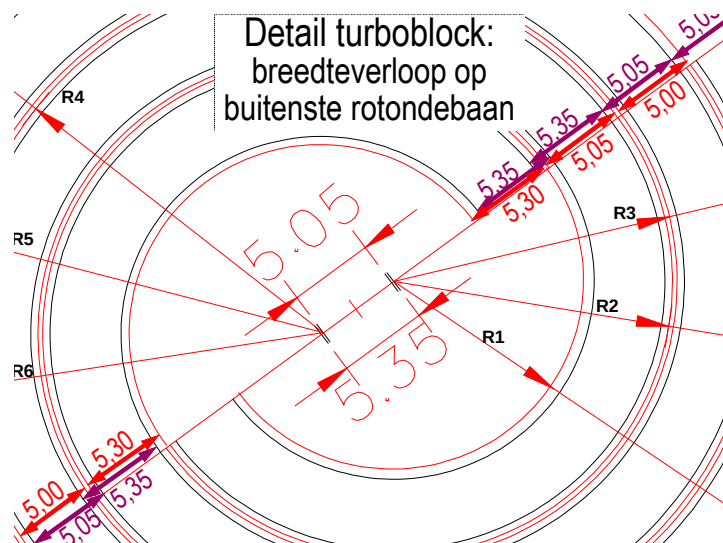
Ontwerpmethodiek turboblock: breedteverloop op buitenste rotondebaan (spiraalrotonde)



Figuur E.3-2 Turboblock van een spiraalrotonde

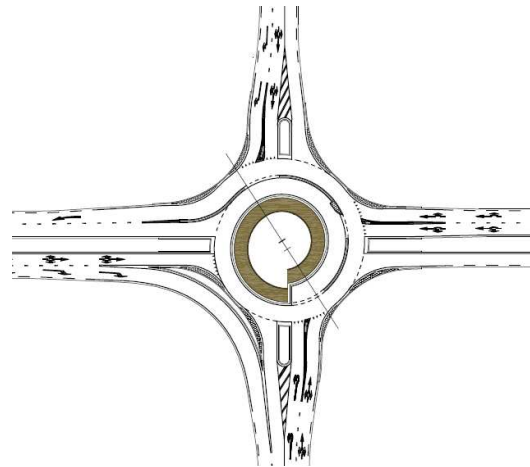
Figuur E.3-3 laat in detail zien hoe dan de middelpunten verspringen: de stralen R1, R2 en R3 hebben dezelfde buitenste middelpunten en de stralen R4, R5 en R6 hebben dezelfde binnenste middelpunten. De rijstrook van de binnenste rotondebaan verandert niet van breedte. Wel verandert de rijbaanbreedte: de linker kantstrook wordt 25 cm smaller, waardoor de rotondebaan niet meer 5,30 m maar 5,05 m breed is. Zoals gezegd, vindt het breedteverloop van de rijstrook plaats op de middelste c.q. buitenste rotondebaan. Aan het begin is deze $5,35 - 0,70 = 4,65$ m breed en pas aan het eind 4,35 m. Maar daar is dan aan de rechterkant de kantstrook weer 25 cm breder, zodat de rijbaan daar, evenals bij de turborotonde, 5,00 m breed is. Door deze andere ontwerpmethodiek worden de stralen R2 en R3 15 cm groter dan bij de turborotonde. En de stralen R4 en hoger worden 30 cm groter. Daarmee is het totale ruimtebeslag van een spiraalrotonde wel iets groter dan die van een turborotonde.

Een alternatief is om de binnenstraal met 35 cm te verkleinen, zodat deze 11,65 m wordt. De kantlijnen van de rijstroken verspringen dan 5,40 m en 5,05 m.



Figuur E.3-3 Detail turboblock spiraalrotonde

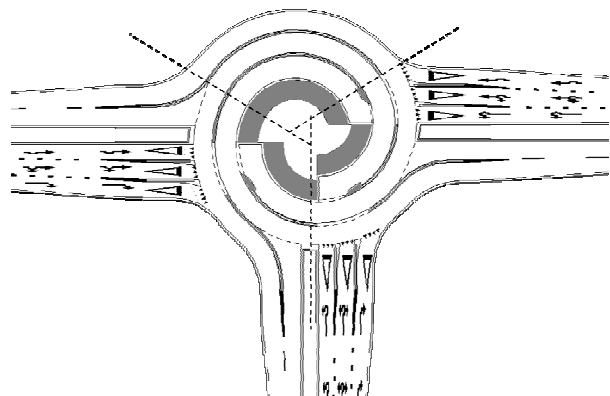
E.4. Turboblock knierotonde



Figuur E.4-1 Principe Knierotonde

Ook de knierotonde kent één translatie-as. Op de knierotonde liggen nergens drie rijstroken naast elkaar. De middelpunten verspringen dan over een afstand die gelijk is aan de helft van die van de turborotonde.

E.5. Turboblock sterrotonde



Figuur E.5-1 Principe Sterrotonde

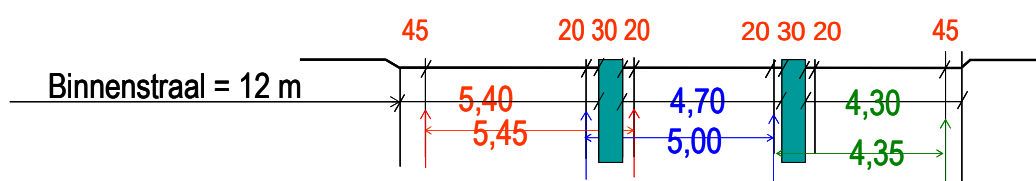
Benadering via een iteratief proces

De translatie-assen staan onder een hoek van 120^0 t.o.v. elkaar, terwijl de aansluitende takken onderling een hoek van 90^0 of 180^0 maken. De eerste stap is de bepaling van de gewenste rijstrookbreedtes. Dit kan niet linea recta gebeuren, omdat op de sterrotonde drie rijstroken over een boog van ca. 120^0 naast elkaar liggen. Dat betekent dat met het turboblock rijstroken met drie verschillende breedtes ontworpen moeten worden. Om een volledige ontwerpvrijheid te hebben zijn daarvoor steeds drie parallelle translatie-assen nodig (vermenigvuldigd met 3 voor het breedteverloop van elk van de rijstroken = 9 translatie-assen, die drie aan drie een gelijkbenige driehoek vormen). Dit is behoorlijk ingewikkeld. Daarom wordt via een iteratief proces het aantal translatie-assen gereduceerd tot 2 maal 3 assen (niet meer dan twee parallelle assen). Begonnen wordt met een bepaling van de rijstrookbreedtes volgens de bestreken banen en daarna wordt een optimum gezocht bij gebruikmaking van slechts driemaal twee parallelle assen.

Rijstrookbreedtes volgens bestreken banen

Uitgangspunt is een gangbare trekker met opleggercombinatie die qua bestreken baan voldoet aan de Europese regelgeving: bij een buitenstraal van 12,50 m mag de binnenstraal van de bestreken baan niet kleiner zijn dan 5,30 m.

Gestart wordt met een binnenstraal van 12 m, analoog aan die van de andere turborotondes. Daarbij hoort een bestreken baan van een rondgaand voertuig (= breedte rotondebahn) van 5,40 m. De binnenstraal van de tweede rijbaan is dan $12 + 5,40 + 0,30 = 17,70$ m (uitgaande van hetzelfde middelpunt, wat niet helemaal klopt, maar bij benadering bruikbaar is.). Daarbij hoort een rijbaanbreedte van ca. 4,65 m, afgerond naar boven 4,70 m. De binnenstraal van de derde rijbaan is dan $17,70 \text{ m} + 4,70 + 0,30 = 22,70$ m. Daarbij hoort een rijbaanbreedte van ca. 4,30 m. Onderstaand is dat geschetst.

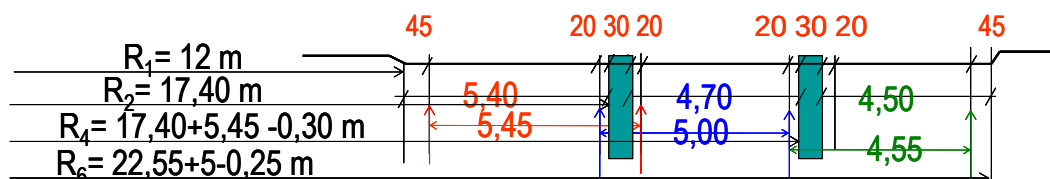


Figuur E.5-2 Benodigde breedte rotondebanen afhankelijk van de bestreken baan

De belijning zou eerst 5,45 m, dan 5 m en dan 4,35 m moeten verspringen. Dat zijn verschillen van $(5,45 - 5) = 0,45$ m en $(5 - 4,35) = 0,65$ m. Om dit te realiseren zouden steeds drie parallelle translatie-assen nodig zijn. Als deze verschillen gelijk zijn, zijn steeds twee parallelle translatie-assen nodig (3x2). Om een te grote complexiteit in het ontwerpproces te voorkomen wordt voor het laatste gekozen.

Keuze van de grootte van het verschil tussen de sprongen

De sprong van 5 m wordt gekozen als uitgangspunt. Verder is het gewenst, dat de rijbaanbreedte aan het eind niet minder dan 4,50 m is. Daarom wordt een verschil van 45 cm tussen de sprongen gekozen. De sprongen worden dan: 5,45 m, 5 m en 4,55 m. Daarmee schuift dan de lijnmarkering per segment op.



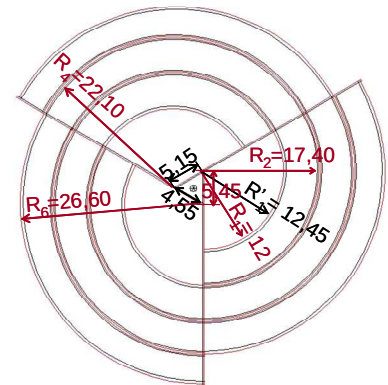
Figuur E.5-3 Bepaling maten turboblock sterrotonde

Plaatskeuze breedteverloop

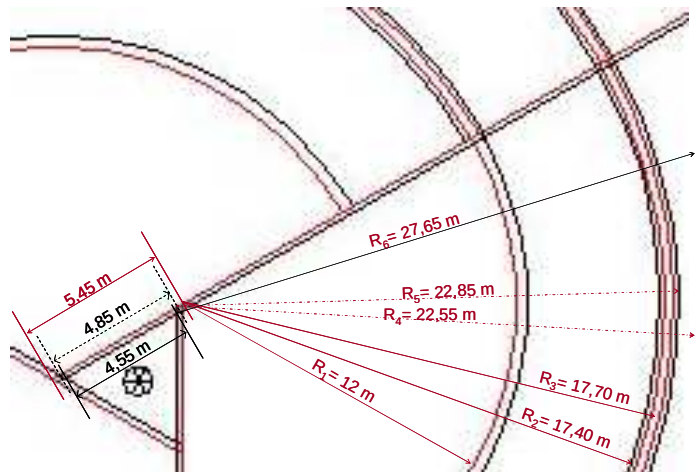
Gelet op het feit dat de middelste rijbaan ook een linksaffer kan bevatten, dient het breedteverloop van deze rijbaan zo gekozen te worden, dat deze pas aan het eind 4,70 m breed is. Als deze aan het begin 4,70 m breed zou zijn, zou deze aan het einde 4,25 m breed zijn. Omdat deze rotondebahn tussen twee scheidingsbanden ligt, is de bochtverbreding voor de afslaanende beweging dan te klein. Dit betekent dat de binnenste baan over de gehele lengte 5,40 m breed is, de tweede baan tussen de baanscheidingen is 25 cm smaller en verloopt van 5,15 m naar 4,70 m en de derde baan is weer 25 cm breder (door de bredere kantstrook) en

loopt van 4,95 m naar 4,50 m. Het turboblock van de sterrotonde kent assen onder 120° . De middelpunten verschuiven over een afstand die steeds 30 cm kleiner is. Doordat de translatieassen onder een hoek van 120° staan, is het verschil in rijstrookbreedte 1,5 maal zo groot, t.w. 45 cm. Hiervoor dienen de parallelle assen op een onderlinge afstand van $\frac{1}{2} \cdot 30 \cdot \sqrt{3} = 52$ cm te liggen.

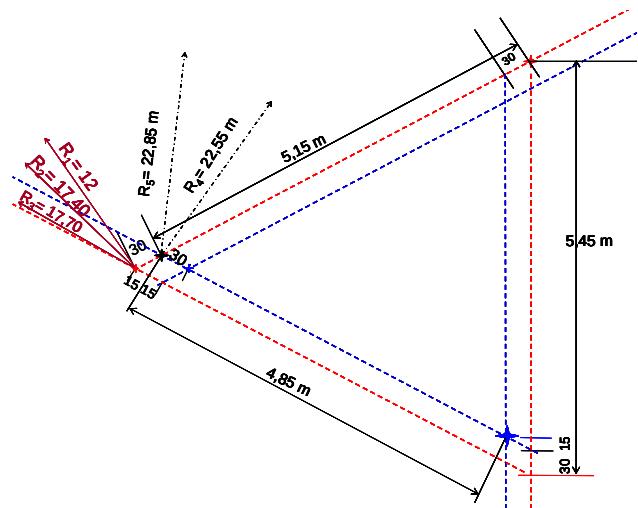
Sterrotonde met doorlopende kantmarkering.
 Binnenste rijbaan constant 5,40.
 Tweede rijbaan verloopt van 5,15 naar 4,70
 Derde rijbaan verloopt van 4,95 naar 4,50



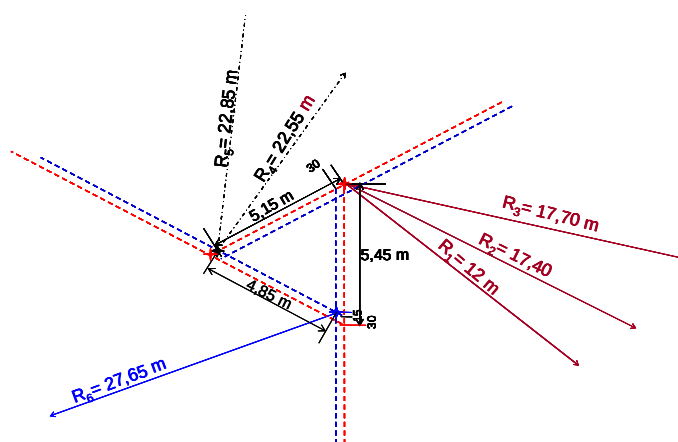
Figuur E.5-4 Turboblock sterrotonde



Figuur E.5-5 Detail turboblock sterrotonde



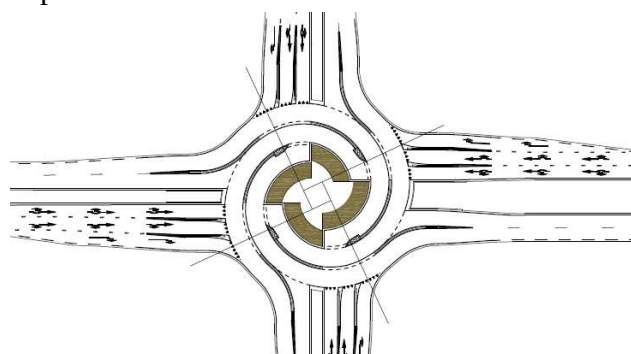
Figuur E.5-6 Uitvergroot detail turboblock sterrotonde



Figuur E.5-7 Zeer uitvergroot detail turboblock sterrotonde

E.6. Turboblock rotorrotonde

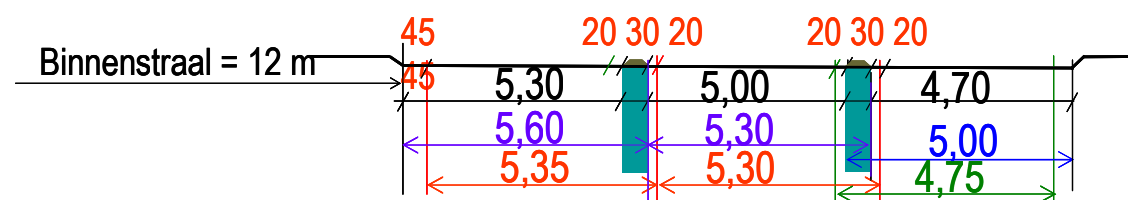
Voor de rotorrotonde zijn vier translatie-assen nodig. Om te bereiken dat ook op die rotonde de rijbaanbreedte kleiner wordt naarmate de baan meer naar buiten ligt, zijn daarbij nog vier parallelle translatie-assen nodig voor de middelpunten van de buitenste rotondebanen.



Figuur E.6-1 Principe rotorrotonde

E.6.1. Ontwerpmethode uitgaande van de kant wegverharding

Bij een rotorrotonde maakt het nogal verschil uit of in het ontwerp rechtstreeks wordt uitgegaan van de kant wegverharding of dat het uitgangspunt een doorlopende kantmarkering is. Allereerst wordt een ontwerpmethodiek behandeld waarin de kant wegverharding het uitgangspunt is



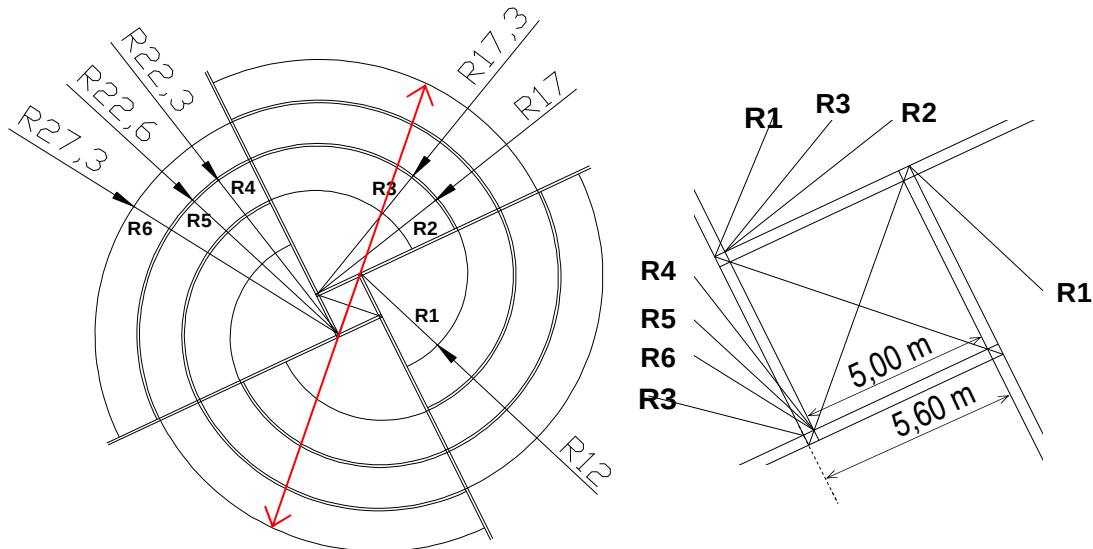
Figuur E.6-2 Breedteverloop rotorrotonde, uitgaande van de kant wegverharding

Om het stelsel van translatieassen niet te ingewikkeld te laten worden, is het van belang, dat de sprongen in breedte gelijk zijn óf nul. In Figuur E.6-2 vindt het breedteverloop in twee stappen plaats:

- in het eerste segment van 5,60 m (= rijbaanbreedte 5,30 + breedte scheidingband 0,30) naar 5,30 m (begin tweede segment);

b) van 5,30 m (begin tweede segment) naar 5,00 m (einde tweede segment).

In Figuur E.6-3 is het turboblock met de verspringende middelpunten en cirkelstralen in beeld gebracht. Opgemerkt moet worden, dat de rijbaan de rotonde verlaat direct nadat deze 4,70 m breed is. De verbreding van de bocht naar de afvoertak wordt dan bepalend voor de rijbaanbreedte. Bij het aanbrengen van die bochtverbreding moet ook bedacht worden, dat in de afvoeroksel de overrijdbaar verhoogde strook naast de rotondebahn ruimte biedt aan voertuigen die een ruimere bestreken baan nodig hebben.



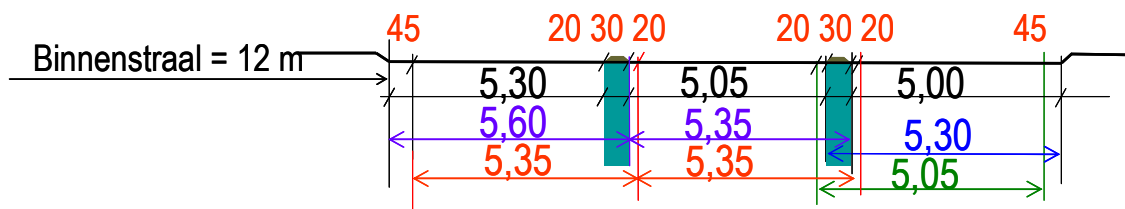
Figuur E.6-3 Turboblock met detail carré verspringende middelpunten van de rotorrotonde (uitgaande van kant wegverharding)

De diameter van een rotorrotonde kan het beste opgemeten worden over de diagonaal door het carré van verspringende middelpunten. Deze bedraagt ca. 52 m.

N.B. Er kan overigens ook voor gekozen worden om in het tweede segment geen breedteverloop toe te passen indien de betreffende rotorrotonde veel door vrachtverkeer gebruikt gaat worden.

E.6.2. Ontwerpmethode uitgaande van de kantmarkering

Een ontwerp waarbij uitgegaan wordt van de kantmarkering, heeft onderstaand breedteverloop tot uitgangspunt (Figuur E.6-4).

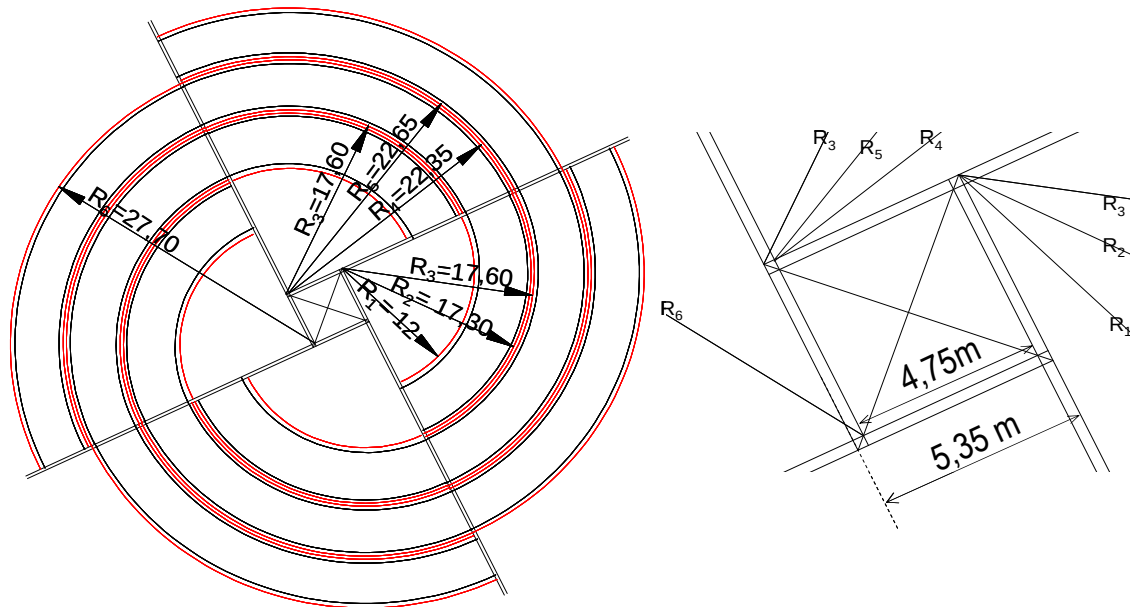


Figuur E.6-4 Breedteverloop Rotorrotonde, uitgaande van de kantmarkering

Uit Figuur E.6-5 is duidelijk (uit de manier waarop de middelpunten verspringen), dat over het eerste segment geen verloop in rijstrookbreedte optreedt. De afstand tussen de rijkant kantmarkering verloopt in het tweede segment van 5,35 m naar 5,05 m en in het derde segment van 5,05 m naar 4,75 m. Overigens geldt hier, dat de rijbaan de rotonde verlaat al

lang voordat deze van 5,00 m versmald is naar 4,70 m: de bochtverbreding van de rotondeafrit is dan bepalend voor de rijbaanbreedte (zodat alleen het breedteverloop in het tweede segment effectief is).

De diameter van deze rotorrotonde bedraagt ca. 53 m



Figuur E.6-5 Turboblock met detail carré verspringende middelpunten van de rotorrotonde (uitgaande van de kantmarkering)

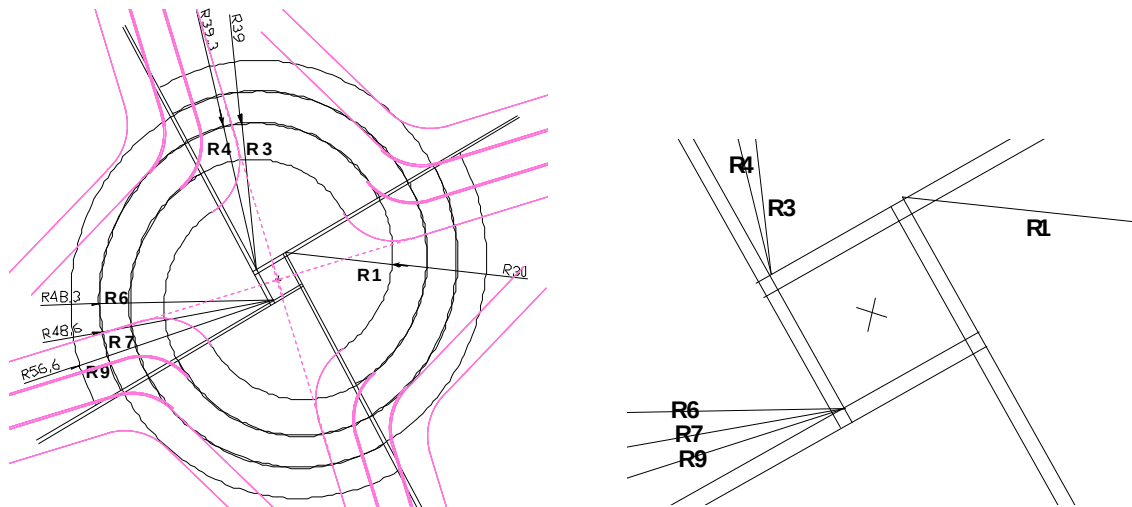
E.7. Ontwerpmethodiek turbopleinen

E.7.1. Turboplein met smalle verkeersgeleiders

Voor het ontwerpen van een turboplein wordt evenals bij de rotorrotonde gebruik gemaakt van vier translatie-assen die in het centrum van het plein elkaar ontmoeten in een vierhoek, die niet altijd een vierkant behoeft te zijn. De vorm van het carré van middelpunten is afhankelijk van de verdeling van de stroken op de segmenten. De translatie-assen bestaan op zichzelf weer uit twee parallelle lijnen, om het verloop van de rijbaanbreedtes mogelijk te maken, zie Figuur E.7-1.

Als een voertuig een translatie-as passeert, gaat het een andere boogstraal berijden. Een voertuig dat bijvoorbeeld linksaf gaat slaan, passeert bij het oprijden van het plein de eerste translatie-as; hier gaat het voertuig de binnenste pleinstraal berijden. Na een kwart plein passeert het de tweede translatie-as; nu gaat het voertuig de buitenste pleinstraal berijden. Na nog een kwart plein passeert het voertuig nogmaals een translatie-as en het verlaat het plein. Het voertuig berijdt zodoende vanuit de krapste boog een steeds ruimere boog, totdat het op de afrit terechtkomt. Dit garandeert een vloeiend en comfortabel stuurverloop. Let wel: ondertussen blijft het voertuig steeds dezelfde rijstrook volgen, want de markering volgt steeds een cirkel met een ander middelpunt en grotere straal. Voor het ontwerpproces is een belangrijk gegeven, dat de middelpunten van de segmenten van de buitencirkels op een

vierkant liggen waarvan de hoekpunten 8,30 m van elkaar liggen, terwijl die afstand voor de binnencirkels 10,30 m is (zie Figuur E.7-1).



Figuur E.7-1 Carré van verspringende middelpunten voor het basisontwerp van een turboplein bij toelopende rotondebannen (met detail)

Daarmee wordt bereikt, dat de pleinbanen voor de rechtdoorgaande baan in één segment 8,30 m naar buiten ‘verschuift’, d.w.z. over de breedte van een 8 m brede rijbaan +30 cm brede overrijdbaar verhoogde rijstrookscheiding.

De maatvoering voor de pleinbanen is royaler dan de maatvoering die CROW-publicatie 126 in tabel 7 hanteert voor tweestrooksrotondes. Daarin wordt bij een straal van 30 m een rijbaanbreedte van 8 m aanbevolen, terwijl die voor het turboplein 10 m is. De overwegingen om bij een turboplein een veel grotere rijbaanbreedte aan te houden zijn:

- op ongeregelde tweestrooksrotondes voorzien van concentrische belijning, zullen twee vrachtwagencombinaties nimmer gelijktijdig oprijden, omdat op het plein het verkeer moet weven; op een verkeersplein dat met verkeerslichten is geregeld, zullen vrachtauto's eerder gelijktijdig naast elkaar oprijden;
- op een met verkeerslichten geregeld verkeersplein is het voor de capaciteit belangrijk dat vertragingen voorkomen worden door auto's die elkaar in de weg zitten.

E.7.2. Voordelen toepassing variabele rijstrookbreedtes

Door het toepassen van verlopende rijbaanbreedtes wordt bereikt, dat:

- het oppervlak aan asfaltverharding ca. 600 m² à 700 m² minder is;
- twee vrachtwagens op de kritieke punten naast elkaar voldoende ruimte hebben;
- de doorrij snelheid van 62 km/h afneemt tot 57 km/h;
- de pleindiameter 6 m kleiner zou kunnen zijn, terwijl de beschikbare opstellengtes niet veranderen.

Ter toelichting: zonder toelopende rijbanen geldt voor de (fictieve) pleindiameter:

$D = 2 \cdot (30 + 10,30 + 10,30 + 10) - 10,30 = 110,90$ m; met toelopende rijbanen is dat $D = 2 \cdot R_6 + 8,30 = 2 \cdot R_9 - 8,30 = 2 \times 56,60 - 8,30 = 104,90$ m. Zie Figuur E.7-1 en Tabel E.1. Dit is ook van invloed op de doorrij snelheid van personenauto's bij weinig verkeer. Zie Tabel E.2.

Overigens kan het bij veel linksafslaand verkeer gewenst zijn deze vrijkomende ruimte ook te gebruiken om de straal van de binnenste pleinbaan met 3 m (10%) te vergroten. Dat levert extra opstelruimte op voor het linksafslaand verkeer.

Tabel E.1 Basismaatvoering turbopleinen

R_{binnen} ($= R_1$) (basis ontwerp)	30 m
$R_{\text{middenbaan}}$ ($= R_4$)	39,3 m
R_{buiten} (fictief) ($= R_9$)	56,6 m
Breedte fictief begin binnenbaan	10 m
Breedte begin middenbaan (begin = breedte binnenbaan eind)	9 m
Breedte buitenbaan	8 m
Fysieke scheiding tussen rijbanen	0,3 m
Diameter	104,9 m

Tabel E.2 Doorrijdsnelheid turboplein met $R_{\text{binnen}} = 30$ m bij verschillende ontwerpprincipes

Rijbaanbreedte	10,30 m	9 → 8 m
$R_{\text{rijcurve rechtdoorgaand}}$	70 m	60 m
Doorrijdsnelheid rechtdoorgaand	62 km/h	57 km/h

E.7.3. Turboplein met brede verkeersgeleiders

Het ontwerp van een turboplein vindt in stappen plaats, die veelal in een iteratief proces herhaald moeten worden om tot een juiste onderlinge afstemming van de ontwerpelementen te komen. De hoofdonderdelen van een turboplein zijn het turboblock enerzijds en anderzijds de aansluitende aanvoertakken, waarbij de richting en de plaats waar de aanvoertakken aansluiten in velerlei opzicht maatgevend zijn voor het verdere ontwerp. De afvoertakken kunnen als laatste worden ‘aangesloten’.

In het ontwerp moet rekening worden gehouden met:

- eisen vanuit berijdbaarheid grote voertuigen (bochtverbredingen die variëren voor de verschillende banen en ook weer anders zijn bij het oprijden);
- eisen vanuit snelheidsreductie bij afsnijden van bochten (daarvoor is de hoekverdraaiing bij het oprijden bepalend, die sterk wordt beïnvloed door de positionering van de aanvoertakken);
- eisen vanuit afscherming doorzicht (door middel van een verkeerseiland tussen de rijbanen voor linksaf en rechtdoor, uitgevoerd in een vorm die geen gevaar oplevert bij vergissing, d.w.z. zo verhoogd uitgevoerd, dat het oncomfortabel overrijdbaar is, maar zonder verticale obstakels);
- eisen vanuit plaatsing VRI-masten, uitleggers en portalen.

Van belang zijn daarbij de volgende aspecten.

Positionering aanvoertakken

De aanvoertakken zo positioneren dat het verlengde van de linker ‘wegkant’ van de rechtdoorstrook door het middelpunt van het plein loopt. Doel hiervan is om bij het oprijden van het plein een zodanige hoekverdraaiing te bewerkstelligen dat de mogelijkheid tot het afsnijden van de bochten zo klein mogelijk is.

Primaire translatie-assen

Bij een plein met een doorsnede van ca 105 m is de straal van de buitenboog ca. $(105-5)/2 =$ ca. 50 m. Uit onderzoek naar de benodigde bochtverbreding is gebleken dat dan op de plaats waar de rijbaan het plein verlaat een rijbaanbreedte van 8 m voldoende is. Inclusief een rijstrookscheiding van 30 cm zouden de binnenhoekpunten van het carré (die de middelpunten vormen van de stralen voor de rechterkant van de buitenste rijbaan op het plein) op een afstand van $2 \times 4 + 0,30 = 8,30$ m moeten liggen. Wanneer men evenwel tussen de buitenste en binnenste rijbanen ruimte voor een verkeerseiland wil creëren om masten te plaatsen voor verkeerslichten (zodat er geen portalen nodig zijn) moet deze afstand groter zijn. Daarvoor is een fysieke breedte van de verkeersdruppel van 2,50 m nodig. Dat leidt dan tot een binnencarré van verspringende middelpunten van $2 \times 4 + 2,5 = 10,5$ m. Het assenstelsel door deze punten duiden we aan als de primaire translatie-assen.

Verbreding verkeerseilanden voor betere verkeersgeleiding

Om te voorkomen dat aan de andere kant van het segment (dus daar waar het verkeer het plein oprijdt) autobestuurders op de linker rijstrook van de 'rechtdoorbaan' van de toerit zonder belemmering naar de 'linksafbaan' op het plein kunnen doorsteken, is ook daar een verbrede overrijdbaar verhoogde strook nodig tussen de binnenste en buitenste banen van het plein. Als daarvoor ook een breedte van 2,50 m zou volstaan, zou de buitenste boog van de binnenste baan op het plein evenwijdig lopen met de binnenste boog van de buitenste baan. In dat geval kunnen de binnenhoekpunten van het carré van de middelpunten op een afstand van $2 \times 4 + 2,50 = 10,50$ liggen. Geconstateerd is, dat daar evenwel een grotere breedte voor de overrijdbaar verhoogde strook nodig is. Gebleken is dat een breedte van de overrijdbare verkeersdruppel van 3,90 m ter hoogte van de (voorliggende) translatie-as goed voldoet. Dat betekent, dat de verhoogde strook taps toe kan lopen. Om ter plaatse van de VRI-masten een breedte van 2,50 m over te houden is een fictieve breedte van 2 m ter plaatse van de volgende translatie-as voldoende. Dat betekent dus dat daar de rijbaan $2 \times 4 + 2 = 10$ m verschoven moet zijn. En dat de primaire translatie-assen niet 10,50 m maar 10 m ten opzichte van elkaar verschoven moeten zijn.

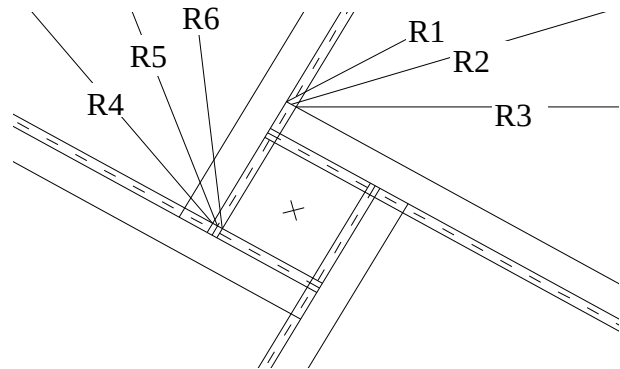
Hulpassen

Ook de rijstroken op het plein verlopen in breedte. De binnenstraal van de rijbaan voor linksaf op het plein is ca. 30 m. In verband met de berijdbaarheid door grote voertuigen is ervoor gekozen om die rijbaan in het eerste segment te laten verlopen van 10 m naar 9 m. De buitenste rijbaan verloopt dan van 9 m naar 8 m. Dit kan worden bereikt door aan het primaire assenstelsel van verspringende middelpunten hulpassen toe te voegen: voor de middelpunten van de rijbaanbegrenzings op 1 m afstand van de primaire assen, voor de rijstrookscheidingen op de banen op 0,5 m afstand. Ook de overrijdbare verkeersgeleider tussen de linksafbaan en de rechtdoorbaan verloopt in breedte. Om dat te bereiken wordt een extra hulpas op $3,90 + 1 = 4,90$ m vanaf de primaire as toegevoegd.

Carré van middelpunten

Voor een turboplein met verkeerseilanden tussen de linksafbaan en de rechtdoorbaan is het carré van middelpunten weergegeven in Figuur E.7-2. In onderstaande tekening is de

nummering zo, dat boogstraal 1 overgaat in boogstraal 4 in het volgende segment; boogstraal 2 gaat over in 5 en boogstraal 3 in 6.



Figuur E.7-2 *Detail carré middelpunten turboplein met verkeerseilanden*

Stralen

Hoewel het ontwerp start met de stralen van de buitenste rijbanen van het turboplein, is de nummering voor de inzichtelijkheid van de opbouw van de spiraal oplopend vanaf de kleinste straal.

Straal linkerkant asfalt binnenste rijbaan van het plein:	$R_{1K} = 25,50 \text{ m}$
Straal linkerkantlijn linker linksafstrook	$R_1 = 25,95 \text{ m}$
Straal aslijn tussen linker en rechter linksafstrook	$R_2 = 30,00 \text{ m}$
Straal rechterkantlijn rechter linksafstrook	$R_3 = 34,15 \text{ m}$
Straal rechterkant asfalt van de binnenste rijbaan van het plein	$R_{3K} = 34,50 \text{ m}$
Straal linkerkant asfalt buitenste rijbaan van het plein	$R_{4K} = 38,80 \text{ m}$
Straal linkerkantlijn linker rechtdoorstrook	$R_4 = 39,15 \text{ m}$
Straal aslijn tussen linker en rechter rechtdoorstrook	$R_5 = 42,30 \text{ m}$
Straal rechterkantlijn rechter rechtdoorstrook	$R_6 = 47,35 \text{ m}$
Straal rechterkant asfalt van de buitenste rijbaan van het plein	$R_{6K} = 47,80 \text{ m}$
Diameter van het plein $D = 2 \times 47,80 + 9,40 = 105 \text{ m}$	

Zoals gezegd, start het ontwerp met de bogen waarvan de middelpunten op de snijpunten van de primaire translatie-assen liggen. Dat zijn de bogen met de stralen R_6 en R_{6K} .

Positionering turboblock

Het turboblock moet zo worden gepositioneerd, dat de tangentialpunten van de inrijbogen voor rechtdoor met de pleinbogen altijd voorbij de translatie-as uitkomen. Omdat in dit ontwerp zich een verkeersgeleider bevindt tussen de linksafstroken en de rechtdoorstroken, is dat voor de linksafstroken niet nodig.

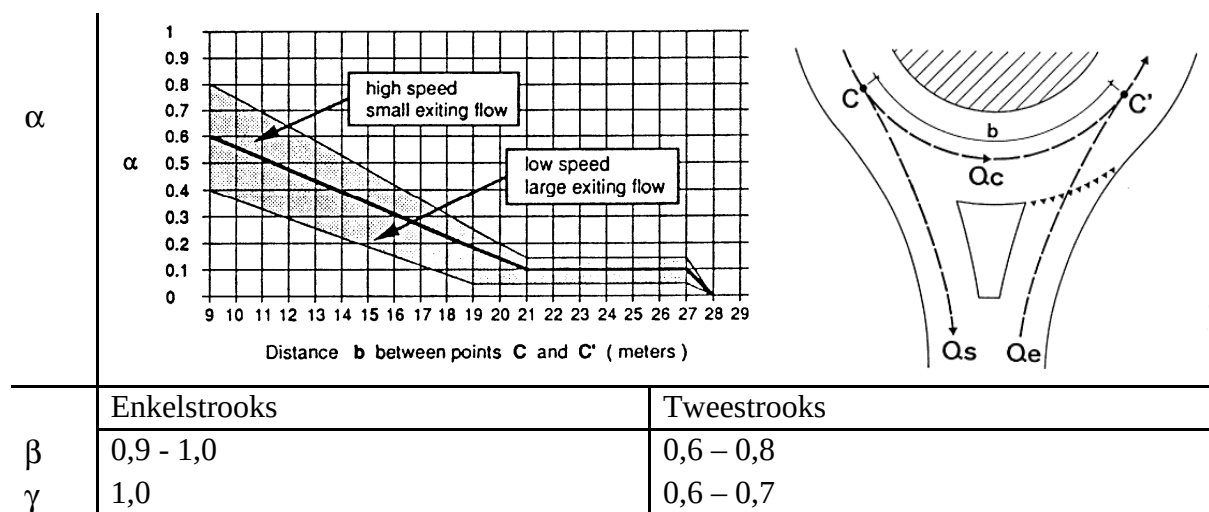
Bijlage F. Capaciteitsmodel turborotondes

F.1. Capaciteitsformules

F.1.1. Capaciteitsformule van Bovy en Meerstrooksrotondeverkenner

Model van Bovy

De formule van Philippe H. Bovy (1991) is een empirische formule die in Zwitserland ontwikkeld 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 afslaand verkeer naar de naastliggende afrit wordt omgegaan via de factor α . Expliciet wordt de afstand tussen toe- en afrit (in Figuur F.1-1 de afstand C-C') als maat gebruikt voor de invloed van het afslaand verkeer (via een factor α).



Figuur F.1-1 Parameters voor de capaciteitsformule van Bovy (ontleend aan Simon, 1991)

Hierbij spelen ook de snelheid en de intensiteit van het afslaand verkeer een rol. Als de snelheid van het afslaand verkeer hoog is, dan wordt de invloed van dit verkeer op de toeritcapaciteit groter. Is de intensiteit van het afslaand verkeer hoog, dan wordt de invloed op de toeritcapaciteit per voertuig juist kleiner. De verklaring hiervoor is dat bestuurders die op de toerit staan te wachten op de hoogte zijn van de hoge afslaand intensiteit. Ze reageren hierop door grotere risico's te accepteren en de rotonde op te rijden voordat duidelijk is of een voertuig op de rotonde afslaat of niet.

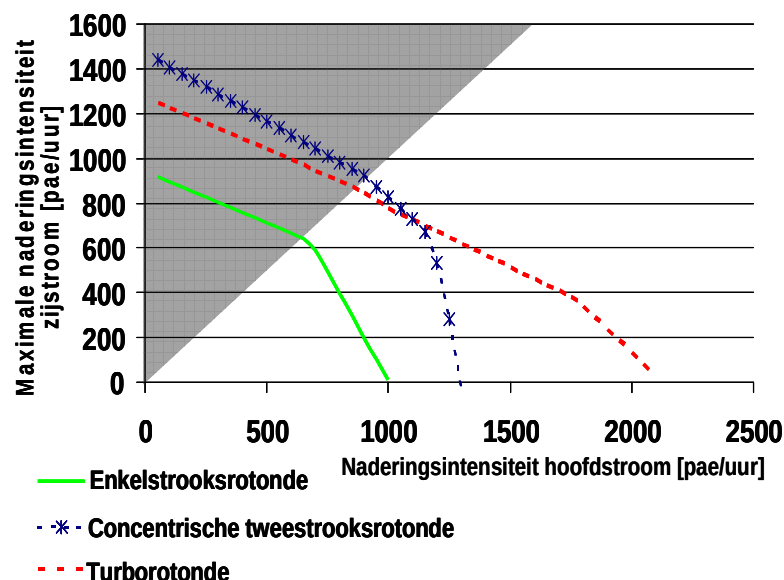
Als de intensiteiten op de rotonde en op de afrit nul zijn, geeft deze formule een capaciteit van een enkele toerit $C_E = 1500$ pae/h. Als het lineaire verband tussen capaciteit en rototonde-

intensiteit juist zou zijn, zou dit corresponderen met een minimum oprijvolgtijd van $3600/1500 = 2,4$ s/pae. De parameters α , β en γ zijn te vinden in Figuur F.1-1.

Meerstrooksrotondeverkenner

Het model van Bovy vormde in 1997 de basis voor de MEERSTROOKSROTONDEVERKENNER. Daarmee zijn in genoemde publicatie de verschillende rotondevormen met elkaar vergeleken (Figuur F.1-2). Er was nog geen turborotonde gebouwd waaraan de parameters gekalibreerd konden worden. Daarom is in eerste instantie een theoretische benadering toegepast voor de waarden van de parameters (Fortuijn en Harte, 1997).

Om de invloed van de – specifieke – verdelingen van het verkeer op de rotondestroken van de turborotonde in de formule van Bovy op te nemen, is deze dusdanig aangepast, dat de waarde β is opgesplitst in β_{zwaar} en β_{licht} voor de zwaarst en lichtst belaste rotondestrook. Verder zijn ook de factor $8/9$ en $1/\gamma$ samen met β_{zwaar} en β_{licht} ondergebracht in de factoren b_{zwaar} en b_{licht} . Daarbij is uitgegaan van de waarden die Bovy had gevonden voor de enkelstrooksrotonde $\beta_{1/1} = 0,9$ en voor de tweestrooksrotonde $\beta_{2/2} = 0,7$. Bij de opsplitsing van $\beta_{2/2}$ is gekozen voor $\beta_{\text{zwaar}} = 0,9$ en $\beta_{\text{licht}} = 2 \cdot 0,7 - 0,9 = 0,5$.



Figuur F.1-2 *Vergelijking capaciteiten verschillende rotondevormen met de eerste versie van de Meerstrooksrotondeverkenner*

Omdat de formules (4.3) t/m (4.5) betrekking hebben op slechts één rijstrook van de toerit (in tegenstelling tot de oorspronkelijke formule), is de waarde $\gamma = 1$ gehanteerd. De overweging daarbij was, dat in de waarde die Bovy voor γ hanteert verdisconteerd is, dat de beide toeritstroken niet optimaal worden benut³⁹.

In een model dat uitgaat van de capaciteit per strook, moet het strookgebruik op een analytische wijze worden bepaald. Op turborotondes is het strookgebruik in hoge mate

³⁹ Uit het rotondeonderzoek is evenwel gebleken, dat de gemiddeld lagere capaciteit per toeritstrook niet alleen het gevolg is van het niet optimaal benutten van de toeritcapaciteit, maar ook van een grotere oprijvolgtijd.

gedetermineerd door de richtingverdeling. Voor zover voor een bepaalde richting twee stroken gebruikt kunnen worden, wordt de keuze van de toeritstrook bepaald door het aantal wachtende voertuigen [uitgedrukt in pae's]. Dit wordt benaderd met de verzadigingsgraad (uitgaande van een Poissonverdeling van de aankomsten).

Verder zijn voor de berekening van de capaciteit van de toeritstroken naar de concentrische tweestrooksrotonde (die zich kenmerkt door twee rotondestroken, twee toeritstroken op de toeritten en enkelstrooks afritten) drie uitgangspunten van belang:

- a) op de toerit zit al het rechtsafslaand verkeer op de rechter toeritstrook en al het linksafslaand verkeer op de linkertoeritstrook (dit is niet afwijkend van de aannamen voor de hoofdtak van de turbortonde), terwijl het rechtdoorgaande verkeer zich vrij over beide toeritstroken verdeelt;
- b) tegenover de volgende aansluitende tak bevindt 50% van het linksafslaand verkeer en al het rechtdoorgaande verkeer zich op de buitenste rotondestrook;
- c) de capaciteit van de enkelstrooks afvoertak is 1600 pae/h.

In het licht van het (latere) onderzoek op Duitse concentrische tweestrooksrotondes met enkelstrooks afritten (Brilon & Bäumer, 2004), leidt aanname a) tot een te gunstige verdeling van het verkeer over beide toeritstroken. Een aanname dat niet meer dan ca. 25 % van het rechtdoorgaande verkeer van de linker toeritstrook gebruik maakt ligt meer voor de hand. Daar staat tegenover dat anderzijds de gekozen waarden voor β_{zwaar} en β_{licht} het effect van de aanname b) ten nadele van de concentrisch tweestrooksrotonde overschatten.

Ten slotte is als uitgangspunt gehanteerd, dat als op één strook van een toerit een verzadigingsgraad van 80 % wordt bereikt, de rotonde zijn praktische capaciteit bereikt. Terzijde zij opgemerkt, dat dit criterium voor kleine zijstromen tot relatief hoge wachttijden kan leiden (Fortuijn en De Leeuw, 2009).

Onder deze aannamen zijn in genoemde publicatie de verschillende rotondevormen met elkaar vergeleken. Als belastingpatroon is van de volgende richtingverdeling uitgegaan: $Q_Z = 0,75 \cdot Q_N$; $Q_W = Q_O = \delta \cdot Q_N$. En alle afslaande richtingen zijn gelijk aan $1/3 \cdot \delta \cdot Q_N$. (Q staat voor de verkeersintensiteit op de naderingstakken van de rotonde en de indices N , O , W en Z voor de verschillende windrichtingen.)

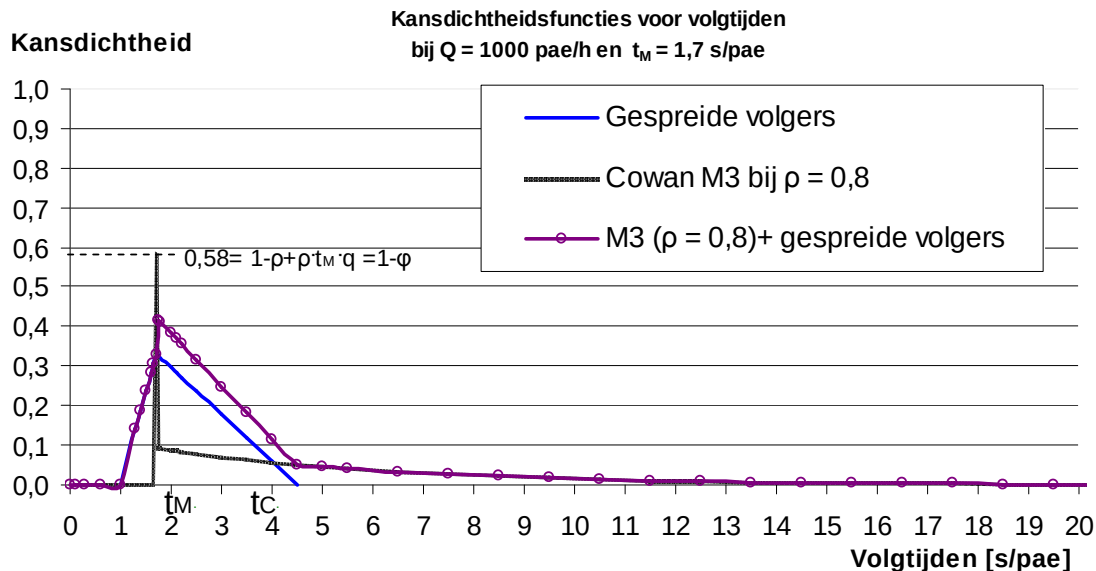
F.1.2. Beschouwing effect afwijkingen van M3 model

In het M3 model wordt aangenomen dat alle volgers een volgtijd hebben van bijvoorbeeld 1,7 s. Die aanname betekent, dat boven een volgtijd van 1,7 s er geen auto's geclusterd zouden rijden. In werkelijkheid is dat niet zo. Stel de volgtijden van de volgers zouden weergegeven kunnen worden met een driehoek, waarvan de basis tussen 1 en 4,5 seconden loopt en een zodanige waarde voor de hoogte, dat het oppervlak van de driehoek gelijk is aan $(1-\phi)$ bij een $\rho = 0,8^{40}$ voor de intensiteit $Q=1000$ pae/h. Verder wordt in de grafische weergave ervan uitgegaan dat deze hoogste waarde optreedt bij $t_M = 1,7$ s. De violette lijn in Figuur F.1-3 geeft een beeld van de daarbij behorende samengestelde kansdichtheidsfunctie van de

⁴⁰ Dit is zo gekozen, om er zorg voor te dragen, dat het aandeel voertuigen dat vrij rijdt gelijk is aan de waarde ϕ in de M3 verdeling, terwijl het verkeer bovenproportioneel geclusterd is.

volgtijden. Bij het benaderen van deze samengestelde functie door een M3-verdeling moet het volgende overwogen worden:

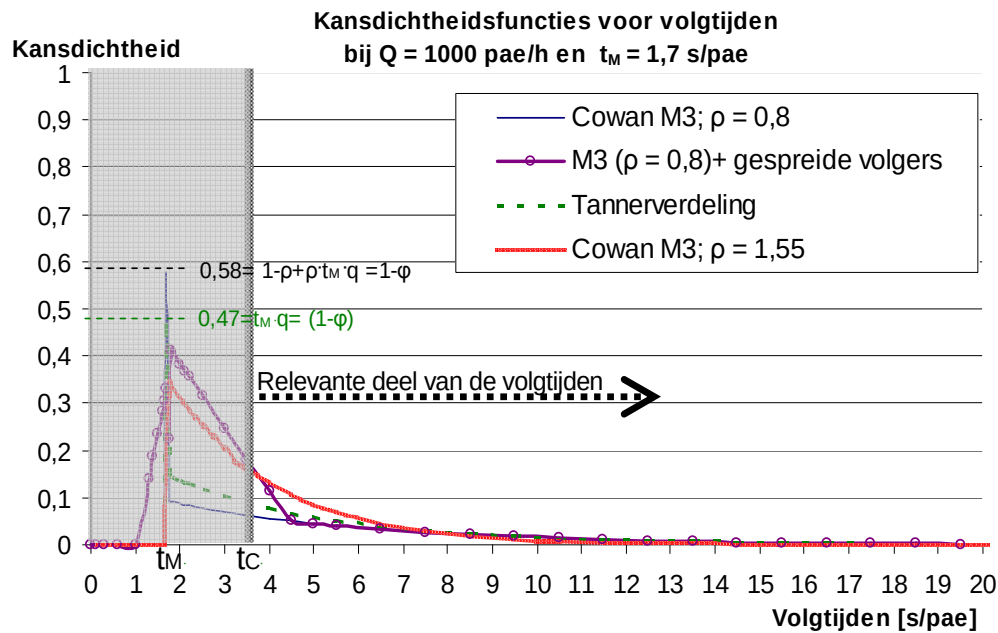
- bij volgtijden groter dan 4,5 s is de verdeling gelijk aan de M3-verdeling met $\phi = 0,58$ (overeenkomend met $\rho = 0,8$ bij een intensiteit van 1000 pae/h);
- bij volgtijden $1,7 \text{ s} < t < 4,5 \text{ s}$ wijkt deze verdeling sterk af van een M3-verdeling; de keuze van een benadering die dan nog het beste aansluit, is sterk afhankelijk van het doel waarvoor deze verdeling moet worden gebruikt.



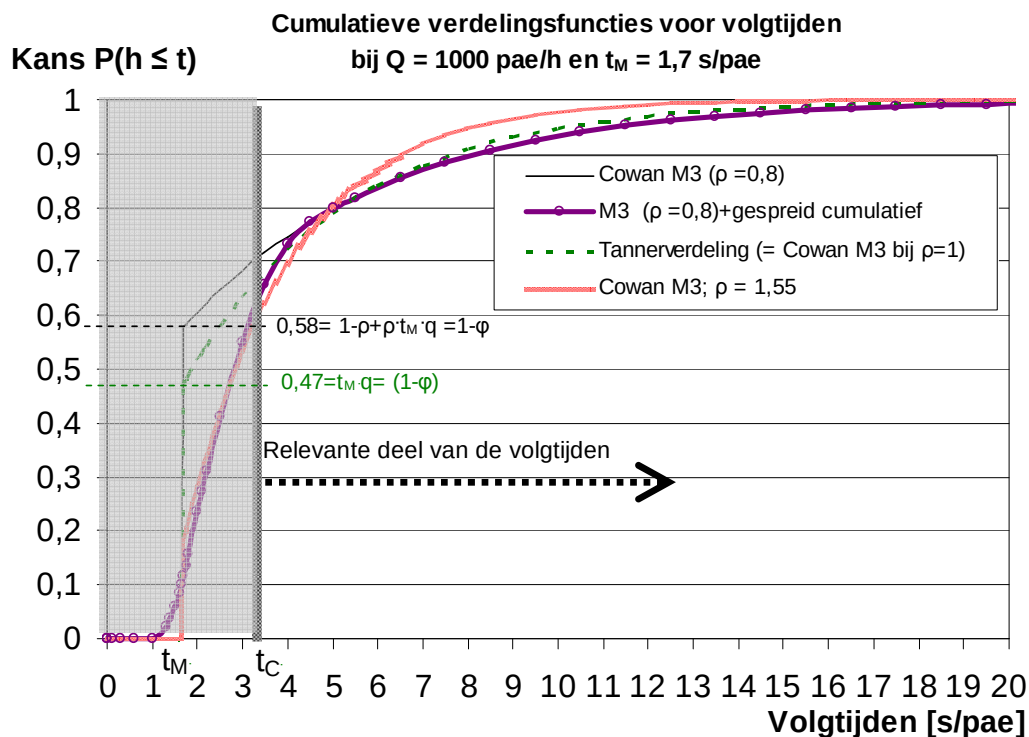
Figuur F.1-3 Opbouw kansdichtheidsfunctie met gespreide verdeling van volgers

Bij gebruik van een M3-verdeling gaat het duidelijk om een benadering van de werkelijkheid. Als alle volgtijden groter dan de minimum volgtijd ($t > t_M$) in beschouwing genomen moeten worden, verdient een benadering met een $\phi > (1 - q \cdot t_M)$ de voorkeur. De oranje lijn ($\rho = 1,55$) benadert in Figuur F.1-4 en Figuur F.1-5 dan de violette lijn het beste. Maar bij de hiaatbenutting zijn alleen de hiaten $t \geq t_C$ van belang. Dan is de ‘Tannerverdeling’ (groene lijn) een betere benadering, mogelijk zelfs beter dan de zwarte curve ($\rho = 0,8$). De curve $\rho = 0,8$ onderschat het aandeel van de volgtijden in het gebied $t_C \leq t \leq 4,5 \text{ s}$. Hoewel in die verdeling het aantal bruikbare hiaten kleiner is, zijn daarin de grotere hiaten beter vertegenwoordigd, wat per saldo positief is voor de capaciteit (zie Figuur F.1-6 of Figuur F.1-7). De oranje curve ($\rho = 1,55$) laat in het gebied $t_C \leq t \leq 6 \text{ seconde}$ juist een sterke overschatting van het aandeel zien, ten koste van de grotere hiaten, met het omgekeerde resultaat.

Zoals opgemerkt, is theoretisch een waarde $\phi > 1 - t_M \cdot q$ een onmogelijkheid. Maar in het waardebereik $1,7 \text{ s} < t < 4,5 \text{ s}$ gaat het in feite niet om de volgtijdverdeling van de proportie vrij rijdende voertuigen, omdat in werkelijkheid een deel als volgers moet worden gekenschetst. Dat verklaart waarom bijvoorbeeld een waarde $\rho = 1,55$ (of Akçelik, 2007, $kd = 0,2$, ongehinderde aanvoertak) toch een praktische betekenis kan hebben als juist de verdeling van de kleinere volgtijden van belang is.



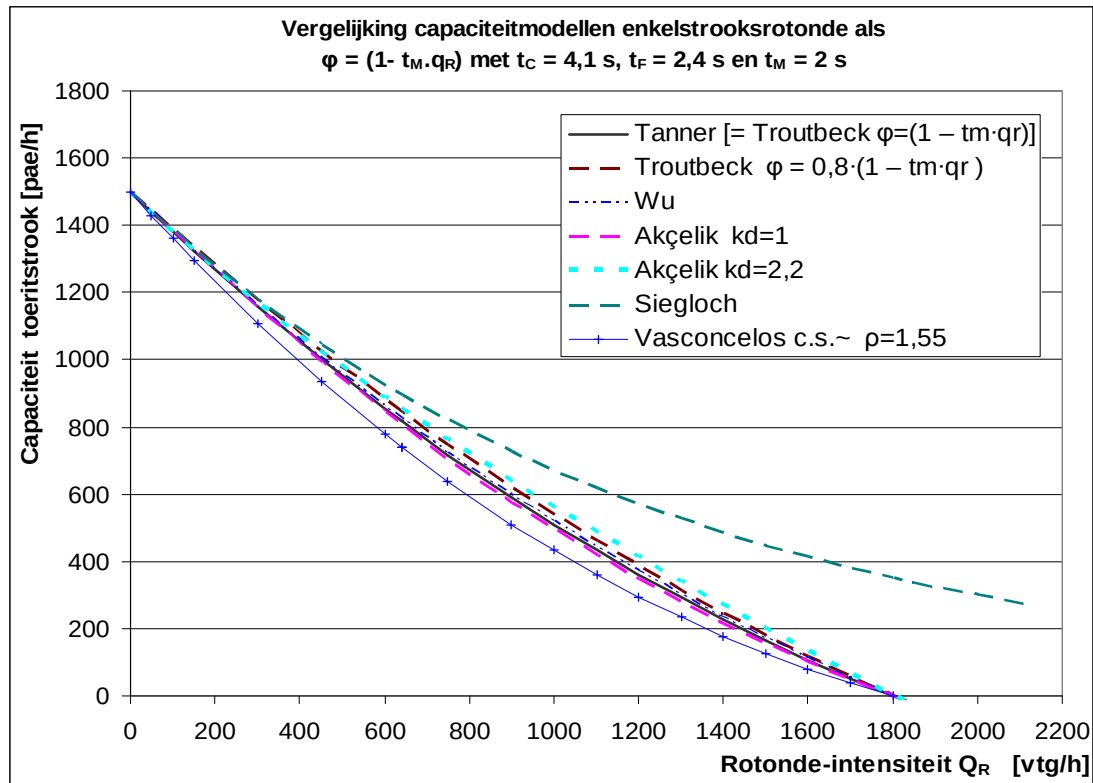
Figuur F.1-4 Vergelijking kansdichtheidsfuncties bij verschillende aannamen verdeling en aandeel volgers



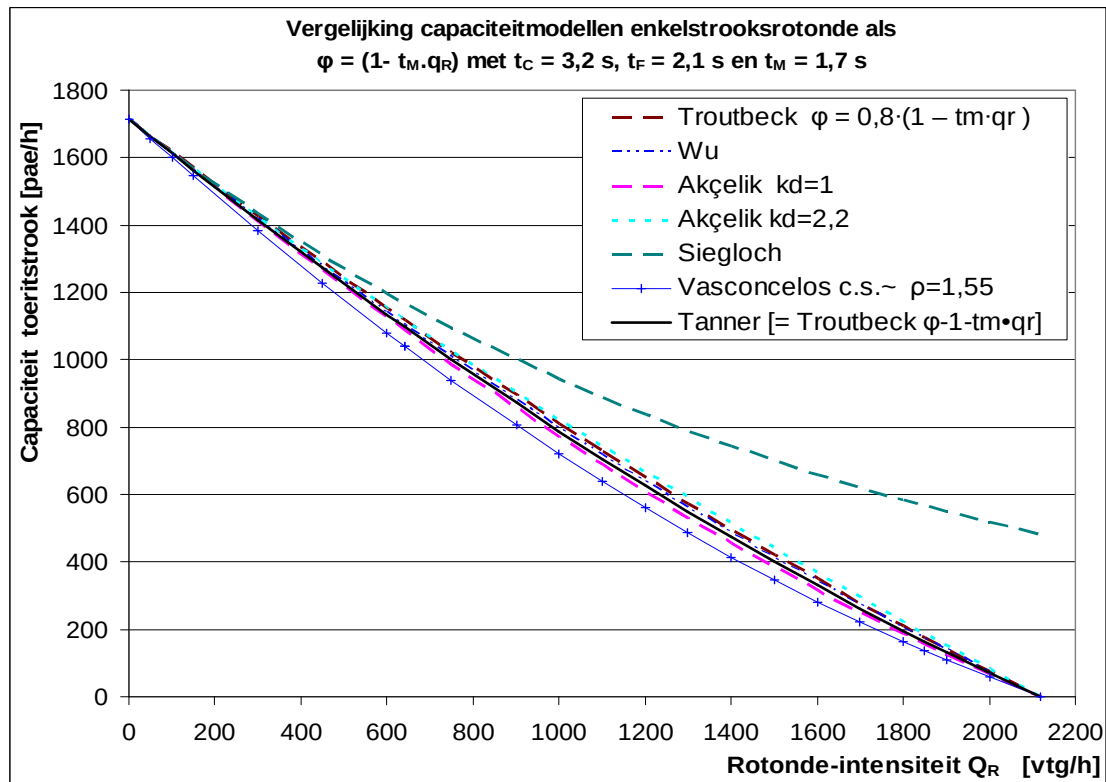
Figuur F.1-5 Vergelijking cumulatieve kansverdelingsfuncties bij verschillende aannamen verdeling en aandeel volgers

F.1.3. Vergelijking hiaatacceptatie-capaciteitsmodellen

In Figuur F.1-6 en Figuur F.1-7 worden verschillende hiaatacceptatie-modellen met elkaar vergeleken.



Figuur F.1-6 Vergelijking 1 hiaatacceptatie-capaciteitsmodellen



Figuur F.1-7 Vergelijking 2 hiaatacceptatie-capaciteitsmodellen

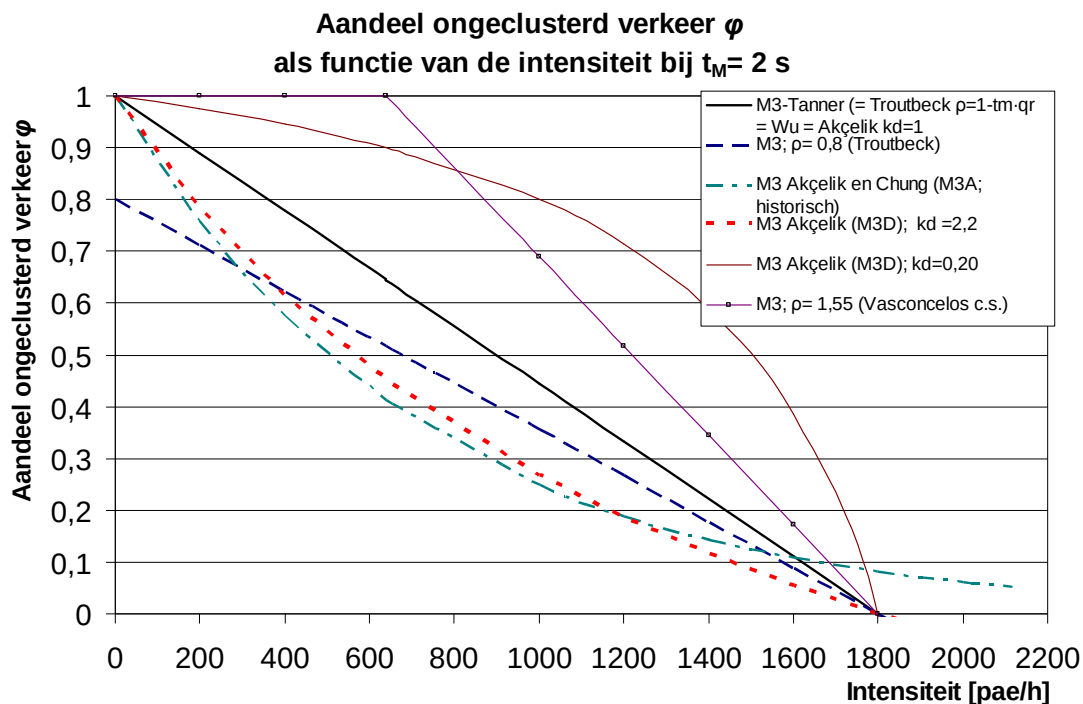
Hieruit kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De aanname voor de hiaatverdeling in de rotondestroom - M1(Harders en Siegloch) of M3 (de anderen) is van grote invloed op het verloop van de capaciteitsfunctie.

- b) Het verschil in benadering van de hiaatbenutting (Tanner en Troutbeck discrete functie, Wu en Akçelik continue functie) leidt tot kleine verschillen in het verloop van de capaciteitsfunctie (Wu iets hoger (maximaal +10 vtg/h en Akçelik $k_d=1$ iets lager (maximaal -14 vtg/h dan Tanner bij $Q_R = 1100$ vtg/h en $Q_E = 430$ vtg/h).
- c) Opvallend is, dat de effecten van alternatieve benaderingen voor de mate van clustering (Troutbeck en Akçelik afwijkend van de 'Tannerverdeling') bij de gebruikelijke waarden de toeritcapaciteit ten opzichte van het model van Tanner maximaal met 55 vtg/h verhogen (Akçelik $k_d=2,2$ bij $Q_R = 1100$ vtg/h).
- d) Wanneer een (theoretisch onmogelijke) waarde $\rho=1,55$ wordt gehanteerd (Vasconcelos e.a., 2011), wordt bij $Q_R = 1100$ vtg/h een toeritcapaciteit gevonden die 72 vtg/h lager is dan in de formule van Tanner.

Duidelijk is, dat de waarden voor het kritisch hiaat t_C , de oprijvolgtijd t_F en de minimum volgtijd t_M van grote invloed zijn op de capaciteitwaarden (verschillen tussen Figuur F.1-6 en Figuur F.1-7).

In Figuur F.1-8 worden de verschillende functies voor het aandeel ongeclusterd verkeer (ϕ) die in Figuur F.1-6 zijn gebruikt, grafisch weergegeven. Het verschil in waarde voor de capaciteit tussen de formule van Tanner en Akçelik $k_d=2,2$ van maximaal 55 vtg/h is veel minder dan in eerste instantie Figuur F.1-8 zou doen vermoeden.



Figuur F.1-8 Vergelijking functies voor aandeel ongeclusterd verkeer (ϕ)

F.1.4. Invoegverstoring in hiaatacceptatie-modellen

Kimber (1980) heeft er al op gewezen, dat invoegend verkeer vaak een verstoring tot gevolg heeft van de hoofdstroom, vooral bij hoge rotonde-intensiteiten. Dat was voor hem destijds een van de redenen om niet uit te gaan van de hiaatacceptatie-theorie. Troutbeck en Kako (1999) hebben een theoretische benadering toegepast om dit versturende effect te kwantificeren. Het samenvoegen op de rotonde veroorzaakt een versturend effect, als het

kritisch hiaat kleiner is dan de som van de minimum volgtijd op de oprijvolgtijd. Uitgangspunt in deze benadering is, dat auto's bij het oprijden van de rotonde een minimum volgtijd aanhouden ter grootte van t_F (ook ten opzichte van de auto's op de rotonde), waarbij dan de auto die zich al op de rotonde bevindt met een minimale volgafstand t_M aansluit. Wanneer nu het kritisch hiaat t_C kleiner is dan de som $t_F + t_M$, moet de auto op de rotonde inhouden voor de invoegende auto vanaf de oprit. Dat heeft dan weer invloed op de grootte van de hiaten daarachter. Dit reduceert de capaciteit. Daartoe is een factor aan de capaciteitsformule toegevoegd, die hier wordt weergegeven met de letter z .

$$C_E = z \cdot \frac{3600 \cdot \phi \cdot q_R \cdot e^{-\lambda_R(t_C - t_M)}}{1 - e^{-\lambda_R t_F}} \quad (f.1)$$

Voor z is in genoemde publicatie de uitdrukking van vergelijking (f.2) afgeleid:

$$z = \frac{1 - e^{-\lambda_R t_F}}{1 - e^{-\lambda_R(t_C - t_M)} - \lambda_R(t_C - t_M - t_F)e^{-\lambda_R(t_C - t_M)}}, \text{ als } t_C - t_M - t_F < 0, \text{ anders } z = 1 \quad (f.2)$$

Het reducerend effect op de capaciteit van het invoegen neemt toe bij toename van de rotonde-intensiteit. Overigens is de aanname hierbij, dat het oprijdend verkeer wel voorrang verleent aan het rotondeverkeer. Tanyel en Yayla (2003) merken in hun studie op, dat in Turkije een groot aantal bestuurders de voorrangsregels niet opvolgt (doordat de meesten van hen niet weten dat ze voorrang moeten verlenen en doordat de voorrangs aanduidingen niet duidelijk zijn). Zij vinden grotere capaciteitsreducties, gerelateerd aan hogere waarden voor de minimum volgtijd (tussen de 1,6 en 2,8 s).

De bepaling van de invloed van de invoegverstoring op een tweestrooksrotonde vraagt om een afzonderlijke theoretische benadering. Duidelijk is, dat bovengenoemde verstoring optreedt in de rotondestroom waar de oprijdende auto zich invoegt, en niet in de stroom die wordt gekruist⁴¹. Auto's die vanaf de rechter toeritstrook de buitenste rotondestrook oprijden, veroorzaken een invoegverstoring (als $t_{CU,2} < t_{F2} + t_M$) op de buitenste rotondestrook en auto's vanaf de linker toeritstrook van de zijtak op de binnenste rotondestrook (als $t_{CI,1} < t_{F1} + t_M$).

Conform vergelijking (f.2) geldt voor de verstoring die auto's vanaf de rechter toeritstrook E2 ondervinden bij het invoegen op de buitenste rotondestrook de reductiefactor voor de capaciteit C_{E2} :

$$z_2 = \frac{1 - e^{-\lambda_{RU} t_{F2}}}{1 - e^{-\lambda_{RU}(t_{CU,2} - t_M)} - \lambda_{RU}(t_{CU,2} - t_{F2} - t_M) \cdot e^{-\lambda_{RU}(t_{CU,2} - t_M)}} \quad (f.3)$$

als $t_{CU,2} - t_{F2} - t_M < 0 \wedge \lambda_{RU} > 0$, anders $z_2 = 1$

De voertuigen die vanaf de linker toeritstrook de buitenste rotondestrook oversteken, veroorzaken weliswaar zelf geen verstoring op de buitenste rotondestrook, maar ondervinden

⁴¹ De enkele keer dat de buitenste rotondestrook wordt geblokkeerd door een auto die het oprijproces onderbreekt (doordat de oprijdende bestuurder heeft geanticipeerd op een hiaat in de binnenste rotondestrook, dat tijdens het oprijden ondertussen – ca. 2 seconden later – aanzienlijk kleiner kan zijn geworden) blijft hier buiten beschouwing.

wel hinder van de invoegverstoring op de buitenste rotondestrook door auto's vanaf de rechter toeritstrook. Immers op die rotondestrook gaan auto's op de rotonde al voor de linker toerit afremmen. Het oorspronkelijke hiaat achter een remmende auto wordt kleiner, waardoor hiaten die vanaf de linker toeritstrook zonder verstoring wel bruikbaar zouden zijn geweest, onbruikbaar worden. Dit betekent dat de capaciteit van de linkertoeritstrook kleiner wordt door twee invoegverstoringen:

- 1) op de binnenste rotondestrook veroorzaakt door auto's die vanuit de (eigen) linkertoeritstrook met een te klein hiaat invoegen;
- 2) op de buitenste rotondestrook, veroorzaakt door auto's die vanaf de rechter toeritstrook met een te klein hiaat invoegen.

De invloed van elk van de genoemde verstoringen 1) en 2) is enerzijds afhankelijk van de verhouding tussen beide rotondestromen en anderzijds van de belastinggraad van de rechter toeritstrook. Als bijvoorbeeld geen enkele auto vanaf de rechter toeritstrook oprijdt, is de verstoring op de buitenste rotondestrook nihil, ook al zou al het rotondeverkeer zich op de buitenste rotondestrook bevinden. Een wiskundige afleiding van de samenhang van deze processen valt buiten de scope van dit proefschrift.

Uit een verkenning met verschillende waarden voor t_C en t_F blijkt, dat de verschillen tussen een aantal mogelijke benaderingen van dit gecompliceerde effect niet groter zijn dan 1 à 2 %. Daarom is er voor gekozen om het effect van de belastinggraad van de rechter toeritstrook buiten beschouwing te laten, omdat dat een complicerende factor zou opleveren in het iteratief proces dat in de prognosefase nodig is om de verdeling van het verkeer over de twee toeritstroken te berekenen, terwijl het resultaat slechts een schijnnaauwkeurigheid zou opleveren. Volstaan wordt met de volgende benadering voor de linker toerit naar een tweestrooks rotondesegment.

Het deel van de capaciteitsreductie als gevolg van het invoegen op de 'eigen' (binnenste) rotondestrook wordt aangeduid met z_1^* . Voor z_1^* geldt⁴²:

$$\left. \begin{aligned} &\text{Als } t_{CI,1} - t_{F1} - t_M < 0 \wedge \lambda_{RI} > 0 \text{ geldt:} \\ &z_1^* = \frac{1 - e^{-\lambda_{RI} \cdot t_{F1}}}{1 - e^{-\lambda_{RI}(t_{CI,1} - t_M)} - \lambda_{RI} \cdot (t_{CI,1} - t_M - t_{F1}) \cdot e^{-\lambda_{RI}(t_{CI,1} - t_M)}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{f.4})$$

anders geldt : $z_1^* = 1$

De invoegverstoringfactor z_1 is de correctie van de totale capaciteit van de linkertoeritstrook, zowel onder invloed van verstoringen op de buitenste als de binnenste rotondestrook. In een vereenvoudigde lineaire benadering leidt dit tot:

$$z_1 = \frac{\lambda_{RI}}{\lambda_{RU} + \lambda_{RI}} \cdot z_1^* + \frac{\lambda_{RU}}{\lambda_{RU} + \lambda_{RI}} \cdot z_2 \quad (\text{f.5})$$

⁴² Het verkeer van de linker toeritstrook van de hoofdtak van de turborotonde 'voegt in' op een strook waarop geen verkeer is. Daarom moet ook als eis gesteld worden dat $\lambda_{RI} > 0$.

In een dergelijke pragmatische aanpak wordt de capaciteitsformule van Hagring voor de linker toeritstrook naar de binnenste rotondestrook gemodificeerd tot:

$$C_{E1} = z_1 \cdot (\Lambda_{RU} + \Lambda_{RI}) \cdot (1 - t_M \cdot q_{RU}) \cdot (1 - t_M \cdot q_{RI}) \frac{e^{-\lambda_{RU}(t_{CU,1} - t_M) - \lambda_{RI}(t_{CI,1} - t_M)}}{1 - e^{-t_{F1}(\lambda_{RU} + \lambda_{RI})}} \quad (f.6)$$

F.1.5. Opmerkingen bij keuze type hiaatacceptatie-model door FGSV

Verrassend is, dat FGSV⁴³ (2006) een model dat oorspronkelijk is ontwikkeld voor een enkelstrooksrotonde (Siegloch, 1973), aanbeveelt voor een meerstrooksrotonde, terwijl het voor een enkelstrooksrotonde een model aanbeveelt, dat is ontwikkeld voor een meerstrooksrotonde (Wu, 1997). Bij nadere analyse is dit begrijpelijk. Op een enkele strook geeft het verwaarlozen van een minimum volgafstand t_M bij hoge rotonde-intensiteiten een vertekening van de capaciteit. Maar op een concentrische tweestrooksrotonde kunnen auto's elkaar wel met een zeer kleine afstand volgen – ten minste als auto's van de twee stroken samen worden beschouwd. Dan is het model van Siegloch of Harders bruikbaar.

In het Duitse onderzoek (Brilon & Bäumer, 2004) zijn op concentrische tweestrooksrotondes de minimum volgtijd per strook (t_M) en het strookgebruik op de rotonde niet als een relevante verklarende variabele gebruikt⁴⁴. Wel bleek het strookgebruik op de toerit van belang: op concentrische rotondes is meer verkeer op de linker strook van de toerit gunstig voor een evenwichtige verdeling. En die is weer afhankelijk van de hoeveelheid verkeer dat linksaf slaat. In de publicatie van Brilon en Bäumer was daarvoor een parameter opgenomen. In de publicatie van FGSV is die verfijning achterwegen gelaten.

F.2. Uitgevoerde onderzoeken

Hieronder zijn de onderzoeken gerangschikt naar locatie.

1) Enkelstrooksrotonde A4/N468 (Klaas van Engelbrechtsweg) te **Schipluiden**, afslag De Lier op de A4, komend vanuit het noorden

Deze enkelstrooksrotonde heeft een buitendiameter van 37,40 m. Er zijn geen overstekende fietsers. Gemeten is de oosttak.

Drie metingen:

- a) dinsdag 20 november 2001, periode tussen 15:45 – 18:15 uur. Deze meting heeft in de periode 15:54 – 18:15 uur 26 clusters opgeleverd van capaciteitsmetingen gedurende 5 minuten (of soms korter);
- b) vrijdag 18 oktober 2002, periode 15:17 – 17:48 uur. Tijdens de meetperiode was eraf en toe neerslag bij een temperatuur van ca. 10° C. Tijdens de meetperiode is enige keren een wachtrij op de rotonde ontstaan vanwege doorstroomproblemen op de aansluiting Woudseweg (N223)/ Klaas Engelbrechtsweg (N468). Deze perioden zijn buiten de verdere

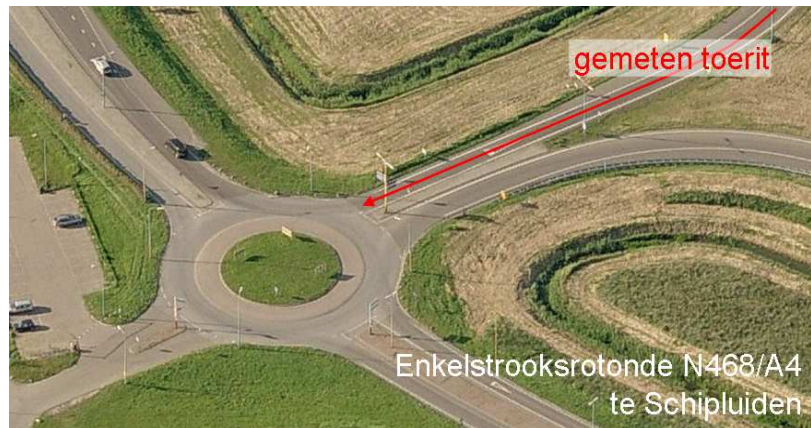
⁴³ Afkorting voor de publicatie van Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Strassenentwurf, getiteld: *Merklblatt für die Anlage von Kreisverkehren*.

⁴⁴ Overigens is niet duidelijk of de waarde $t_M = 0$ een schattingsresultaat is, of a priori is ingevuld.

analyse gehouden. Deze meting heeft 30 bruikbare clusters van capaciteitsmetingen gedurende 5 minuten (of soms korter) opgeleverd;

- c) dinsdag 29 oktober 2002, periode 6:50 – 9:00 uur. Droog weer bij 17° C. Ook tijdens deze waarnemingsperiode is de afvoer vanaf de rotonde enige malen gestremd geweest. Verder is geconstateerd, dat automobilisten op de rotonde soms voorrang verlenen aan het toeritverkeer. Deze meting heeft in de periode 7:40 – 8:53 uur 11 clusters opgeleverd van capaciteitsmetingen gedurende 5 minuten (of soms korter).

Figuur F.2-1 **Rotonde**
Schipluiden



In totaal zijn op deze rotonde 67 clusters van intensiteiten verzameld, variërend van 165 seconden tot 300 seconde, waarin op de rotondetoeit vanaf de rijksweg congestie optrad en de afrit niet geblokkeerd was (dus waarin de toeritcapaciteit gemeten kan worden). Daarnaast is van elke voertuigpassage de tijd genoteerd, met een nauwkeurigheid van ca. 1 seconde.

2) Rotonde in de N472 / N209 / aansluiting **Bergschenhoek**

Deze rotonde heeft een diameter van 50 m. De uitbuiging in zuid-noordrichting is geringer dan op een standaard enkelstrooksrotonde, waardoor de doorrijnsnelheid hoger is. Ook kan het verkeer vanuit het oosten sneller oprijden. Er zijn fietsoversteken met fietsers uit de voorrang. Eén meting op woensdag 6 november 2002, periode 7:30 – 8:45 uur. Gemeten is de oosttak vanuit Bergschenhoek, die 15 clusters van intensiteiten van 5 minuten (of soms korter) opleverde waarin op de rotondetoeit vanuit het oosten congestie optrad. Voorts trad ook op de noordelijke tak congestie op, waar de intensiteiten visueel gemeten zijn.

Figuur F.2-2 **Rotonde**
Bergschenhoek



3) *Enkelstrooksrotonde N481/N214 te **Papendrecht** (ten noorden van de aansluiting van de N214 aan de A15)*

Deze enkelstrooksrotonde heeft een diameter van 37,40 m. Er zijn fietsoversteken met fietsers uit de voorrang. Eén meting op 19 november 2001, periode 7:00 – 8:45 uur. Verzameld zijn 15 clusters van intensiteiten van 5 minuten (of soms korter), waarin op de rotondetoeit vanuit het noorden congestie optrad (dus waarin de capaciteit gemeten kan worden). Door de aanwezige mist was de zichtlengte beperkt. Door de onderzoekers is geoordeeld, dat “de beperkte zichtlengte echter niet van invloed was op de verkeersafwikkeling op de rotonde”. Bij de analyse is echter geconstateerd dat in dit onderzoek de oprijvolgtijden op de toerit groter zijn dan bij de andere rotondes. Onbekend is of dit samenhangt met het slechtere zicht, of dat andere factoren hiervoor verantwoordelijk zijn.



Figuur F.2-3 *Rotonde Papendrecht*

4) *Turborotonde N471 Van Hogendorpweg / Landscheidingsweg, aansluiting Rodenrijs te **Rotterdam***



Figuur F.2-4 *Rotonde Rotterdam*

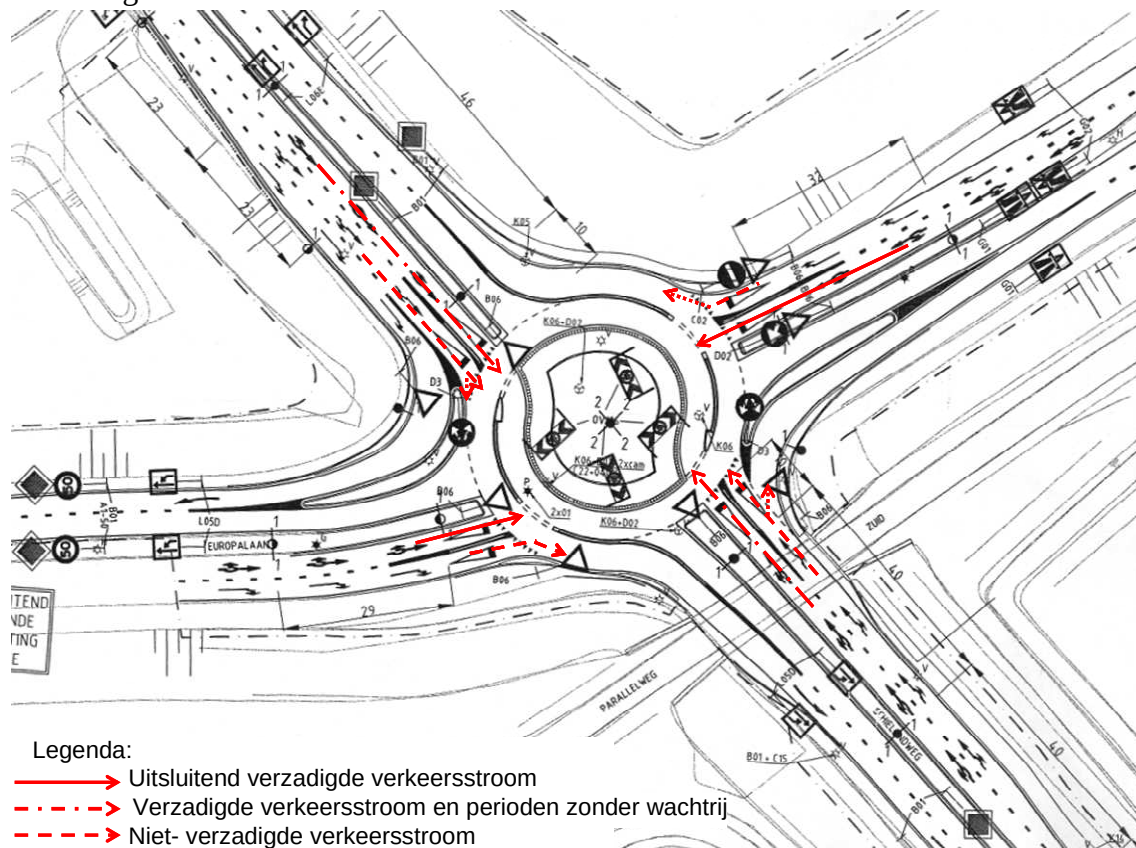
Drie metingen:

- Op 26 april 2001, tussen 7:30 en 9:00 uur, uitgevoerd door praktikanen bij DHV. Hiervan zijn geen video-opnames beschikbaar. Dit onderzoek heeft vier aaneengesloten perioden van 5 minuten en één periode van 14,5 minuut met filevorming op de oostelijke aansluittak opgeleverd, waaruit zeven perioden van capaciteitsgegevens van ca. 5 minuten konden worden samengesteld. Daarnaast zijn nog drie perioden van 1 minuut en één periode van 3 minuten gerapporteerd. De passagemomenten zijn niet gerapporteerd.
- Op 30 oktober 2002, periode 6:50 -9:00 uur. Het onderzoek heeft in de periode 7:31 – 8:39 uur 7 capaciteitswaarnemingen opgeleverd.
- Op 5 november 2002 periode 7.00 en 9.00 uur. Dit onderzoek heeft in de periode 7:27 – 8:30 uur 12 capaciteitswaarnemingen opleverde.

5) Turborotonde N219/Europalaan - A20 te **Nieuwerkerk a/d IJssel**

Op deze rotonde zijn de volgende metingen uitgevoerd:

- Maandagmiddag 3 september 2007: eerste waarneming van 16:00-18:00 uur, wisselend bewolkt en zonnig.
- Dinsdagmorgen 4 september 2007: 2^e waarneming van 7:00-9:00 uur, lichte regen gedurende eerste kwartier, daarna zonnig.
- Dinsdagmiddag 4 september 2007: 3^e waarneming van 16:00uur-18:00 uur; zonnig weer.
- Woensdagmorgen 5 september 2007: 4^e waarneming van 7:00-9:00 uur, bewolkt maar droog.

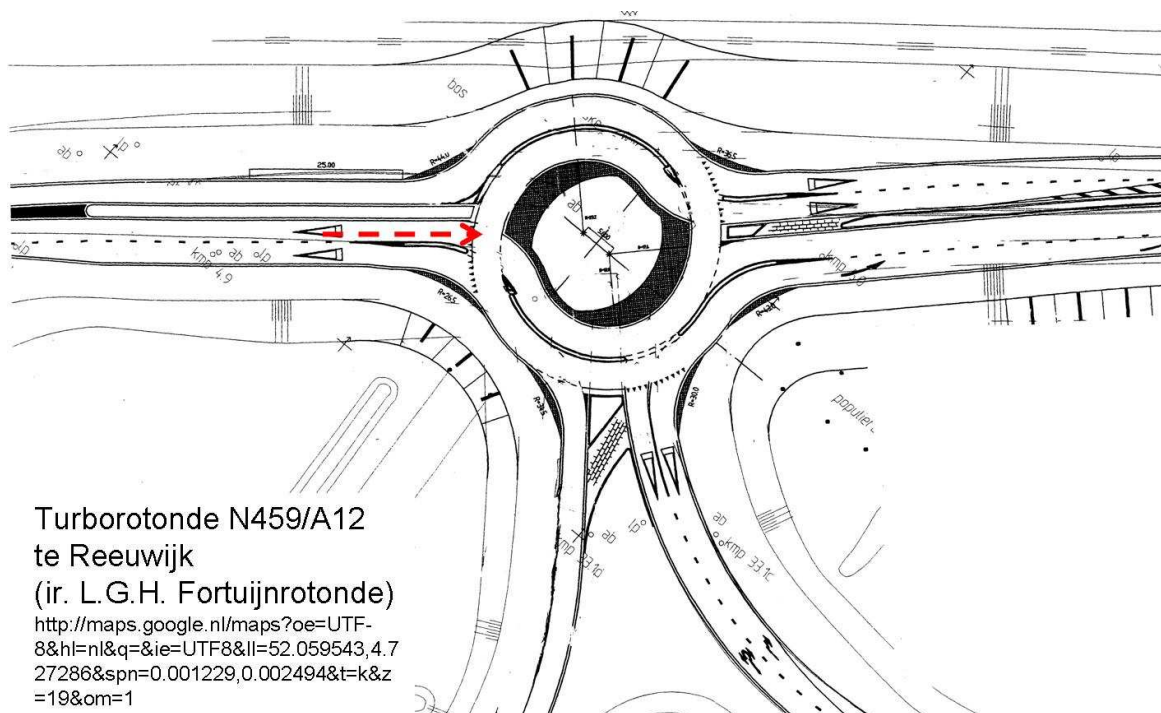


Figuur F.2-5 Rotonde Nieuwerkerk a/d IJssel

Om te voorkomen dat er terugstuwning plaats zou vinden vanaf de noordelijke rotonde, is er op de noordelijke passeerbaanrotonde een omleiding gerealiseerd. Hierdoor moest verkeer vanuit het noorden naar de A 20 in westelijke richting een U-turn maken via de turborotonde. Hiermee is vanaf de noordelijke tak een ongebruikelijke manoeuvre geïntroduceerd (wat in de gemeten waarden voor het kritisch hiaat en oprijvolgtijd is terug te vinden). Voor de overige richtingen had dit tot gevolg dat veel meer metingen in congestiesituatie beschikbaar zijn gekomen. Wel moet er rekening mee worden gehouden dat de volgtijden op de rotonde hierdoor ook wat groter waren dan gebruikelijk.

6) Turborotonde N459/A12noord te **Reeuwijk**

Het onderzoek is op 18 en 19 juni 2004 uitgevoerd om manoeuvrefouten in beeld te brengen (zie hoofdstuk 7). Op de linker toeritstrook van de westtak trad zo nu en dan een wachtrij op, waardoor het mogelijk was hiaatmetingen uit te voeren. Deze perioden waren echter te kort om te verwerken tot capaciteitwaarnemingen



Figuur F.2-6 Rotonde Reeuwijk

Kortheidshalve worden de rotondes in de tabellen aangeduid met hun **plaatsnaam**.

F.3. Hiaatacceptatie-parameters

F.3.1. Kritisch hiaat⁴⁵

Tabel F.3.1 *Schattingsresultaten bruto en netto kritisch hiaat van personenauto's in de buitenste rotondestrook*

Rotondetype, en ligging toeritstrook			$t_{CU\ bruto}$			$t_{CU\ netto}$			$N_{A\ bruto}$	$N_{A\ netto}$	Q_E	Q_{RU}	Q_{S1}
			$t_{CU\ bruto}$	STD	$N_{CU\ bruto}$	$t_{CU\ netto}$	STD	$N_{CU\ netto}$					
Toerit enkelstrooks-rotonde	Schipluiden Ø 37 m 29-10-2002	c	3,02	0,23	51	2,89	0,12	35	56	38	575	1118	305
	Schipluiden alle dagen	c	3,16	0,28	101	2,95	0,10	60	108	64	1005	495	181
	Bergschenhoek Ø50 m	c	3,28	0,19	108	3,21	0,23	58	114	62	692	981	195
	Papendrecht	c	3,61	0,00	4	3,81	0,00	1	6	1	785	172	488
Linker strook aansluiting hoofdtak turborotonde	Reeuwijk W-arm	a	3,81	0,68	137	-	-	-	-	-	544	485	-
	Nieuwerkerk Noord arm	c	3,66	0,36	145	3,32	0,12	57	153	62	781	565	503
		a	3,72	0,45	269	3,38	0,28	116	283	122	769	459	516
	Nieuwerkerk Zuid arm	c	3,37	0,87	253	3,20	0,74	183	316	231	331	1187	109
		a	3,62	0,95	648	3,44	0,86	478	757	556	350	1011	149
	Nieuwerkerk N+Z samen	c	3,46	0,79	398	3,21	0,63	240	469	293	575	851	322
Rechter strook aansluiting hoofdtak	Reeuwijk W-arm	a	3,91	1,17	121	-	-	-	-	-	365	490	-
	Nieuwerkerk N-arm	a	4,17	1,59	273	3,60	0,80	114	298	127	343	459	516
	Nieuwerkerk Z-arm	a	3,67	0,85	421	3,42	0,46	323	497	378	190	1011	149
	Nieuwerkerk N+Z samen	a	3,85	1,13	694	3,46	0,55	437	795	505	266	735	333
Linker strook aansluiting zijtak turboronde	Rotterdam	c	3,42	0,80	35	3,06	0,48	18	38	18	471	474	235
	Nieuwerkerk O-arm	c	3,07	0,70	154	2,89	0,58	95	168	100	448	550	222
	Nieuwerkerk W-arm	c	2,79	0,50	83	2,60	0,40	52	88	57	430	424	174
	Nieuwerkerk O+W samen	c	2,99	0,66	237	2,79	0,54	147	256	157	439	489	199
Rechter strook zijtak, incl. Q_{RI}	Nieuwerkerk O-arm	c	3,37	0,51	69	3,07	0,21	41	71	43	588	607	239
		a	3,48	0,73	434	3,29	0,64	259	470	276	478	669	245
	Nieuwerkerk W-arm	a	4,93	2,28	118	4,15	2,04	71	139	80	101	534	232
		Nieuwerkerk O+W samen	a	3,77	1,21	552	3,45	0,89	330	609	356	289	602
Rechter strook zijtak excl. Q_{RI}	Nieuwerkerk O- arm	c	3,12	0,45	24	2,86	0,30	11	25	11	588	607	239
		a	3,06	0,29	130	2,75	0,12	54	146	59	478	669	245
	Nieuwerkerk W-arm	a	3,64	0,68	12	2,48	0,00	4	19	5	101	534	232
		Nieuwerkerk O+W samen	a	3,10	0,35	142	2,75	0,12	58	165	64	289	602
Legenda: STD vet: grote onnauwkeurigheid ($STD \geq 30\%$ v.d. waarde)													
3e kolom:		a = alle waarnemingen; c = waarnemingen alleen tijdens congestie;											
4e- 6e kolom:		$t_{CUbruto}$ = kritisch hiaat in de buitenste rotondestrook ongeacht of er sprake was van een schijnconflict;											
7e -9e kolom:		$t_{CUnetto}$ = kritisch hiaat in de buitenste rotondestrook waarbij de hiaten waarin sprake was van een schijnconflict, buiten beschouwing zijn gelaten;											
10e kolom:		$N_{A\ bruto}$ = het aantal geaccepteerde hiaten in de buitenste rotondestrook ongeacht of er sprake was van een schijnconflict, inclusief dat van bestuurders waarvan het grootste verworpen hiaat groter was dan het geaccepteerde;											
11e kolom:		$N_{A\ netto}$ = idem, maar waarbij de hiaten waarin sprake was van een schijnconflict, buiten beschouwing zijn gelaten.											

⁴⁵ De waarden in de tabellen A.3-1 t/m A.3-6 gelden voor uitsluitend personenauto's [s/pae]. De uitkomsten voor alle voertuigen samen liggen 4 à 5 % hoger. Die verhoging moet worden toegepast voor een vergelijking met waarden voor kritische hiaten waarin geen onderscheid is gemaakt naar voertuigsoort (bijvoorbeeld Hagring).

Tabel F.3.2 Schatting kritisch hiaat van personenauto's voor linker toeritstrook in buitenste en binnenste rotondestrook

Rotondetype en ligging toeritstrook			Buitenste rotondestrook						Binnenste rotondestrook						Q_E	Q_{RU}	Q_{RI}	Q_{S1}
			t_{CU} bruto			t_{CU} netto			t_{CI} bruto			t_{CI} netto						
			t_{cu} bruto	STD	N_{CU} bruto	t_{cu} netto	STD	N_{CU} netto	t_{ci} bruto	STD	N_{CI} bruto	t_{ci} netto	STD	N_{CI} netto				
Linker strook aansluiting zijtak turbo- rotonde	Rotterdam Oost arm	c	3,42	0,80	35	3,06	0,48	18	3,23	0,27	54	3,16	0,16	30	471	474	554	235
	Nieuwerkerk Oost arm	c	3,07	0,70	154	2,89	0,58	95	3,24	0,47	206	2,95	0,23	121	447	550	668	222
	Nieuwerkerk West arm	c	2,79	0,50	83	2,60	0,40	52	3,15	0,47	255	2,93	0,31	173	430	424	886	174
	Nieuwerkerk O+W samen	c	2,99	0,66	237	2,79	0,54	147	3,19	0,48	461	2,94	0,29	294	439	489	774	199

Volledigheidshalve zijn de waarden t_{CU} in Tabel F.3.2 opnieuw vermeld

Tabel F.3.3 geeft het kritisch hiaat in de buitenste rotondestrook, waaruit al dan niet een groep hiaten is verwijderd:

- 1) alle hiaten, dus inclusief de hiaten waarin tegelijkertijd een voertuig op de binnenste rotondestrook passeerde en tegelijkertijd een voertuig afsloeg (t_{CU2} incl, bruto);
- 2) hiaten zonder die waarin een voertuig op de binnenste rotondestrook passeerde (t_{CU2} excl, bruto);
- 3) hiaten zonder die waarin zich een afslaand voertuig bevond (t_{CU2} incl, netto);
- 4) hiaten zonder die waarin zich een afslaand voertuig bevond of waarin een voertuig op de binnenste rotondestrook passeerde (t_{CU2} excl, netto).

Gelet op de zeer grote spreiding in de data van de rechter strook vanaf de westelijke toerit zijn alleen de data vanaf de oostelijke tak bruikbaar.

Tabel F.3.3 Onderzoek invloed van verkeer op binnenste rotondestrook op de hiaatacceptatie van het verkeer op de rechter toeritstrook van zijtak turborotonde

1 2 3 4		Met passages binnenste rotondestrook			Zonder passages binnenste rotondestrook			N_A incl.	N_A excl.	Q_E	Q_{RU}	Q_{RI}	Q_{S1}	
		$t_{CU,2}$ incl.			$t_{CU,2}$ excl.									
		t_{CU} incl.	STD	N_{CU} incl.	t_{CU} excl.	STD	N_{CU} excl.							
Rechter strook zijtak, (met passages op S1) <i>bruto</i>	Nieuwerkerk O-arm	c	3,37	0,51	69	3,12	0,45	24	71	25	588	607	554	239
		a	3,48	0,73	434	3,06	0,29	130	470	146	478	669	668	245
	Nieuwerkerk W-arm	a	4,93	2,28	118	3,64	0,68	12	139	19	101	534	886	232
	Nieuwerkerk O+W samen	a	3,77	1,21	552	3,10	0,35	142	609	165	289	602	774	239
Rechter strook zijtak (zonder passages op S1) <i>netto</i>	Nieuwerkerk O- arm	c	3,07	0,21	41	2,86	0,30	11	43	11	588	607	554	nvt
		a	3,29	0,64	259	2,75	0,12	54	276	59	478	669	668	nvt
	Nieuwerkerk W-arm	a	4,15	2,04	71	2,48	0,00	4	80	5	101	534	886	nvt
	Nieuwerkerk O+W samen	a	3,45	0,89	330	2,75	0,12	58	356	64	289	602	774	nvt

a :voor alle waarnemingen

c: alleen voor de waarnemingen als er een wachtrij optrad (congestie).

De verhouding t_{CU2} incl, bruto / t_{CU2} excl, bruto =1,08. Deze verhoging vindt plaats onder invloed van 69-24= 45 waarnemingen waarin het kritisch hiaat niet alleen door verkeer op de

buitenste rotondestrook maar tegelijkertijd ook door verkeer op de binnenste rotondestrook wordt bepaald. Gebruikmakend van de uitdrukking $\frac{Std[t_1 - t_2]}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{Var[t_1]}{n_1} + \frac{Var[t_2]}{n_2}}$ en het

kritieke gebied van de t-toets bij een eenzijdige overschrijdingskans van 5% voor $t_{0,05, 45-1} = 2,02$ (45-1 vrijheidsgraden omdat $N_{CU2 \text{ excl, bruto}} \subset N_{CU2 \text{ incl, bruto}}$) kan worden geconcludeerd, dat met 95 % zekerheid $t_{CU2 \text{ excl, bruto}}$ niet meer dan 15 % hoger is dan $t_{CU2 \text{ incl, bruto}}$.

Consistentie en homogeniteit

Tabel F.3.4 Onderzoek inconsistentie in hiaatacceptatie

Rondotype en ligging toeritstrook			t_{CU} bruto	N_{CU} bruto	t_{CU} netto	N_{CU} netto	N_A bruto	N_A netto	Bruto inconsis- tentie	Netto inconsis- tentie
Toerit enkelsrooks- rotonde	Schipluiden Ø 37 m 29-10-2002	c	3,02	51	2,89	35	56	38	9%	8%
	Schipluiden Ø 37 m alle dagen	c	3,16	101	2,95	60	108	64	6 %	6%
	Bergschenhoek Ø50 m	c	3,28	108	3,21	58	114	62	5 %	6%
	Papendrecht	c	3,61	4	3,81	1	6	1	33 %	-
Linker strook aansluiting hoofdtak turborotonde	Reeuwijk W-arm	a	3,81	137	-	-	-	-	-	-
	Nieuwerkerk Noord arm	c	3,66	145	3,32	57	153	62	5 %	8%
		a	3,72	269	3,38	116	283	122	5 %	5%
	Nieuwerkerk Zuid arm	c	3,37	253	3,20	183	316	231	20 %	21%
		a	3,62	648	3,44	478	757	556	14 %	14%
	Nieuwerkerk N+Z samen	c	3,46	398	3,21	240	469	293	15 %	18%
Rechter strook aansluiting hoofdtak turborotonde	Reeuwijk W-arm	a	3,91	121	-	-	-	-	15 %	-
	Nieuwerkerk N-arm	a	4,17	273	3,60	114	298	127	8 %	10%
	Nieuwerkerk Z-arm	a	3,67	421	3,42	323	497	378	15 %	15%
	Nieuwerkerk N+Z samen	a	3,85	694	3,46	437	795	505	13 %	13%
Linker strook aansluiting zijtak turboronde	Rotterdam	c	3,42	35	3,06	18	38	18	8 %	0%
	Nieuwerkerk O-arm	c	3,07	154	2,89	95	168	100	8 %	5%
	Nieuwerkerk W-arm	c	2,79	83	2,60	52	88	57	6 %	9%
	Nieuwerkerk O+W samen	c	2,99	237	2,79	147	256	157	7 %	6%
Rechter strook zijtak, incl. Q_{RI}	Nieuwerkerk O-arm	c	3,37	69	3,07	41	71	43	3 %	5%
		a	3,48	434	3,29	259	470	276	8%	6%
	Nieuwerkerk W-arm	a	4,93	118	4,15	71	139	80	15%	11%
	Nieuwerkerk O+W samen	a	3,77	552	3,45	330	609	356	9%	7%
Rechter strook zijtak excl. Q_{RI}	Nieuwerkerk O- arm	c	3,12	24	2,86	11	25	11	4%	0%
		a	3,06	130	2,75	54	146	59	11%	8%
	Nieuwerkerk W-arm	a	3,64	12	2,48	4	19	5	37%	20%
	Nieuwerkerk O+W samen	a	3,10	142	2,75	58	165	64	14%	9%

Toelichting op Tabel F.3.4

Om de schijn-inconsistentie als gevolg van verschil in situatie te onderscheiden van de feitelijke inconsistentie, zijn hiaten waarin zich wel en waarin zich geen afslaannde auto bevond, onderscheiden (verschil tussen bruto en netto aantallen).

Het aantal geaccepteerde hiaten zonder dat zich er een afslaande auto in bevond wordt genoteerd als $N_{A\text{ netto}}$. Als het daarbij behorende grootste verworpen hiaat groter was dan het geaccepteerde, is dat hiatenpaar niet meegenomen in de bepaling van het kritisch hiaat en komt dan ook niet voor in $N_{CU\text{ netto}}$. Als maat voor de netto inconsistentie wordt hier gedefinieerd:

$$aandeel\ inconsistentie\ bestuurders = (N_{A\text{ netto}} - N_{t_{C\text{ netto}}}) / N_{A\text{ netto}} \quad (\text{f.7}).$$

Als dezelfde verhouding wordt berekend voor de bruto waarden (dus inclusief het schijnconflict) wordt niet alleen de inconsistentie in hiaatkeuze gemeten. Dan kan de gemeten afwijking mede te wijten zijn aan niet-homogeniteit als gevolg van het schijnconflict. In het vervolg wordt dit aangeduid als:

$$de\ bruto\ inconsistentie = (N_{A\text{ bruto}} - N_{t_{C\text{ bruto}}}) / N_{A\text{ bruto}} \quad (\text{f.8}).$$

Voor de enkelstrooksrotondes blijft de netto inconsistentie onder de 10%, met uitzondering van de rotonde te Papendrecht. Daar is deze zeer hoog (33%). Bovendien was er slechts één geaccepteerd hiaat zonder afslaand voertuig, zodat geen reële waarde voor het netto kritisch hiaat kon worden vastgesteld. Dit zijn aanwijzingen dat op deze rotonde sprake was van een uitzonderlijke situatie (mistig weer, zeer weinig rotondeverkeer; grote afslaande verkeersstroom).

Voor de turborotondes is de zaak gecompliceerder: de variatie in inconsistentie is daar groter. Opvallend is, dat de inconsistentie van bestuurders vanaf de hoofdtak grotere uitschieters kent dan vanaf de zijtak. Omdat het niet aannemelijk is dat we dan te maken hebben met een populatie bestuurders met andere kenmerken, is dit een aanwijzing voor een ander fenomeen: bestuurders reageren minder consistent en mogelijk ook meer verschillend (gelet op de grotere variatie in inconsistentie) op verschillen in complexiteit. Immers, hoewel vanaf de hoofdtak een bestuurder aan verkeer op slechts één rotondestrook voorrang hoeft te geven, vragen drie verkeersstromen (Q_{RU} , Q_{S1} en Q_{S2}) zijn aandacht, ook al levert één ervan (Q_{S2}) geen enkel feitelijk conflict op. Daarentegen moet vanaf de linker rijstrook van de zijtak weliswaar voorrang worden verleend aan twee rotondestroken (waarvoor van elk een eigen kritisch hiaat kan worden bepaald), maar daarnaast werkt slechts één verkeersstroom (de afslaande beweging) verstorend.

Concluderend: hoe schever de verhouding is tussen het aantal stroken die een echt conflict opleveren en die welke geen conflict opleveren (maar wel verstorend werken), hoe minder consistent de bestuurders reageren. De afwijking tussen assumptie (1) en de werkelijkheid neemt bij toenemende complexiteit dus toe.

Tabel F.3.5 Kritisch hiaat voor verschillende combinaties van rotondestroken en toeritstroken volgens Hagring

Minor lane(Entry)	Major lane (Circulatory roadway)	
	Near lane (Outer circulatory lane)	Far lane (Inner circulatory lane)
Inner lane (Left lane Entry) ⁴⁶	4.797 (4.615)	4.356 (4.403)
Outer lane (Right lane Entry)	4.276 (4.273)	3.991 (3.998)

⁴⁶ Na correctie van een verwisseling van 'Outer lane' en 'Inner lane' in zijn publicatie uit 1998, cf. zijn publicatie in 2000 in Transportation Research, part B, blz. 293 -313 en aangevuld met de daarin vermelde getallen.

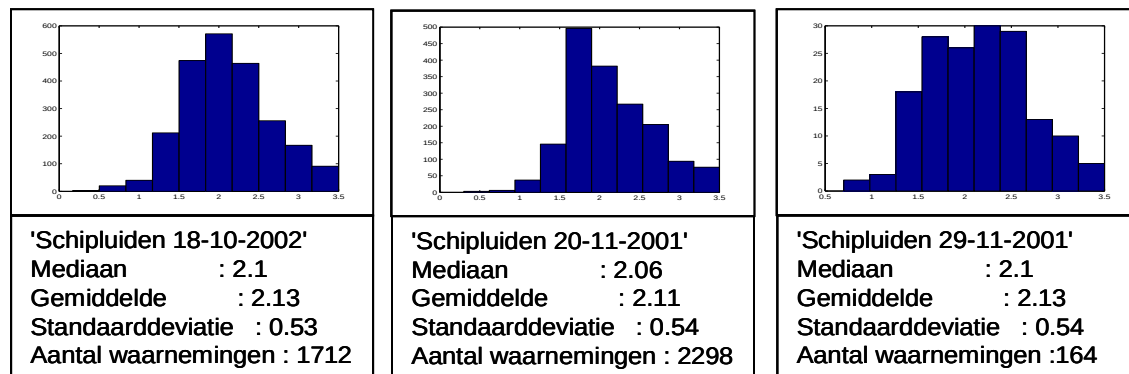
Conclusies kritisch hiaat in detail

- a) Op grond van de t-toets kan, met een foutkans $p < 0,04 \%$, worden geconcludeerd, dat de verschillen tussen de kritische hiaten van de enkelstrooksrotonde Bergschenhoek en van Schipluiden ($\Delta t_{CU \text{ bruto}} = 3,28 - 2,16 = 0,12 \text{ s/pae}$ en $\Delta t_{CU \text{ netto}} = 3,21 - 2,95 = 0,16 \text{ s/pae}$) afwijken van nul. Daarbij is het kritisch hiaat van Bergschenhoek groter dan dat van Schipluiden. Een mogelijke verklaring hiervoor is, dat de diameter van de rotonde Bergschenhoek ($\varnothing 50 \text{ m}$) groter is dan die van Schipluiden ($\varnothing 37 \text{ m}$), waardoor de doorrijnsnelheid op de rotonde ook hoger ligt.
- b) De gevonden kritische hiaten op de verschillende takken van de turborotondes wijken nog sterker van elkaar af. Hiervoor kan ten dele een verklaring gevonden worden in verschillen in vormgeving. Voor zover mogelijk wordt daar hierna aandacht aan besteed. Ook zal aandacht worden besteed aan verschillen in verkeerssituatie.
- c) Vanaf de linker toeritstrook van de zijtakken is het kritisch hiaat op de turborotonde Nieuwerkerk zowel voor de buitenste als de binnenste rotondestrook lager dan dat op de enkelstrooksrotonde Schipluiden. Op de turborotonde Rotterdam zijn deze waarden iets hoger. De vormgeving biedt hiervoor geen verklaring. Een mogelijk verschil is, dat er op de rotonde te Rotterdam normaal geen filevorming optreedt terwijl dat op de rotonde te Nieuwerkerk gebruikelijk is.
- d) Het kritisch hiaat vanaf de linker toeritstrook van de hoofdtak van de turborotonde is (tijdens congestie) $0,3 \text{ s/pae}$ hoger dan op de enkelstrooksrotonde Schipluiden. Voor de rechter toeritstrook van de hoofdtak bedraagt dit verschil $0,5 \text{ s/pae}$.
- e) Buiten congestieperioden zijn de waarden van het kritisch hiaat hoger dan in perioden met congestie. Dit verschil bedraagt $0,06$ tot $0,25 \text{ s/pae}$.
- f) De duidelijk hogere waarden van het kritisch hiaat vanaf de hoofdtak doet vermoeden dat de vormgeving een relatief hoge oriëntatietijd vraagt. Mogelijk dat de vorm van het begin van de binnenste rotondestrook daarop van invloed is. Ondertussen is de start van de binnenste rotondestrook aangepast en in die aangepaste vorm opgenomen in de Nederlandse CROW-aanbevelingen voor de turborotonde. Het is nog niet mogelijk geweest het effect hiervan te onderzoeken. Maar het feit dat de bestuurder vanaf de hoofdtak drie stromen op de rotonde moet onderscheiden waarvan er maar één relevant voor hem is, is vermoedelijk daarop van grotere invloed (zie volgend punt).
- g) Ten slotte: hoe complexer de aard van de schijnconflicten, hoe groter het kritisch hiaat van het werkelijk (resterende) conflict en hoe groter de inconsistentie en de variatie daarin, die mogelijk duidt op grotere verschillen tussen bestuurders in het reageren op complexiteit.
- h) Op de rotonde Reeuwijk was de waarde voor het kritisch hiaat voor de linker toeritstrook van de hoofdtak het hoogst, nl. $3,81 \text{ s/pae}$, gevolgd door die van de noordtak van de rotonde Nieuwerkerk ($3,72 \text{ s/pae}$). Op de rotonde Reeuwijk komen geen hiaten voor waaruit voertuigen afslaan (afslaand verkeer vormt geen schijnconflict maar een 'schijnbeweging') en op de rotonde Nieuwerkerk kwam veel verkeer van de noordtak dat werd omgeleid.

F.3.2. Oprijvolgtijden

Motivering keuze voor de mediaan in plaats van het gemiddelde

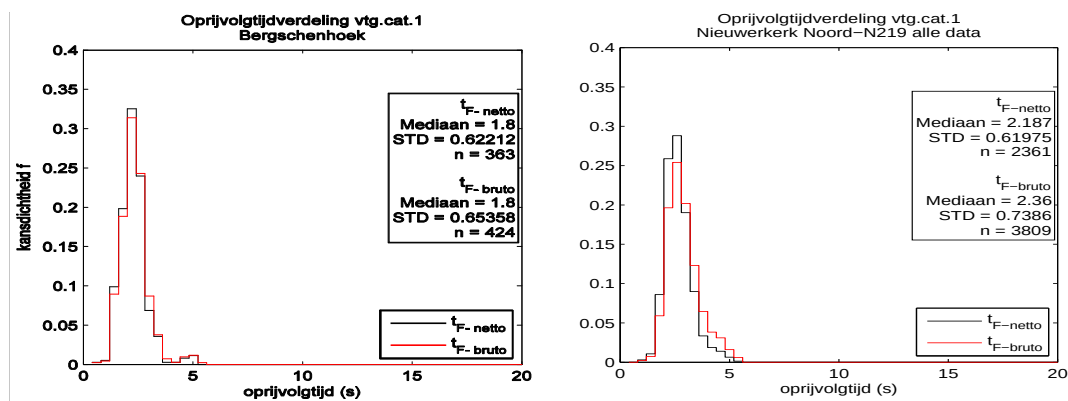
Bij de oprijvolgtijd gaat het om een kenmerk van het oprijden van de rotonde en niet om het bepalen van verstoringen die kunnen optreden in het aansluiten van auto's in een rij op de toevoerweg. Om de invloed van die verstoringen in de data te reduceren wordt niet het gemiddelde maar de mediaan gebruikt als waarde voor de oprijvolgtijd. Als waarden boven de 3,5 seconde worden geëlimineerd, liggen beide waarden dicht bij elkaar. Figuur F.3-1 laat het verschil zien tussen de mediaan en het gemiddelde van de oprijvolgtijd van dezelfde toerit op verschillende onderzoeksdagen.



Figuur F.3-1 Frequentieverdeling van oprijvolgtijden van dezelfde toevoerstrook op verschillende waarneemdagen

Beïnvloeding oprijvolgtijd door schijnconflict afslaand verkeer

Onderscheiden zijn de 'bruto' en de 'netto' oprijvolgtijden. Als bruto oprijvolgtijd $t_{F\text{ bruto}}$ wordt gedefinieerd de mediaanwaarde van de oprijvolgtijden van personenauto's, gebruikmakend van hiaten in de rotondestroom waar tussenuit ook voertuigen zijn afgeslagen naar de naastgelegen afrit. De netto oprijvolgtijd $t_{F\text{ netto}}$ is verkregen door alleen die oprijvolgtijden te beschouwen waar gebruik is gemaakt van hiaten in de rotondestroom, waar tussenuit geen voertuig is afgeslagen. Het verschil in gevonden waarden geeft een indruk van de invloed van het schijnconflict. Figuur F.3-2 laat histogrammen zien waarin zowel de netto als de bruto oprijtijd zijn weergegeven.



Figuur F.3-2 Frequentieverdeling van de bruto en netto oprijvolgtijden van de enkelstrooksrotonde Bergschenhoek en de linker toeritstrook van de noordtak van de turborotonde Nieuwerkerk

Tabel met alle oprijvolgtijden

In Tabel F.3.6 zijn de oprijvolgtijden van personenauto's weergegeven, gerangschikt naar de ligging van de toeritstrook. Naast de in deze tabel vermelde waarden zijn ook de oprijvolgtijden van alle voertuigen samen bepaald (niet weergegeven). De waarden daarvan zijn ca. 5 % hoger.

Tabel F.3.6 Oprijvolgtijden van personenauto's

Rotondetype, en ligging toeritstrook			t_{Fbruto}			t_{Fnetto}			Q_E	Q_{RU}	Q_{S1}
			t_F	STD	N	t_F	STD	N			
Toerit enkelsrooks-rotonde	Schipluiden Ø 37 m	c	2,1	0,63	5346	2,1	0,61	4767	1006	595	181
	Bergschenhk Ø50 m	c	1,8	0,65	424	1,8	0,62	363	692	981	195
	Papendrecht	c	2,45	0,78	931	2,28	0,69	618	785	172	488
Linker strook aansluiting hoofdtak turborotonde	Nieuwerkerk Noord arm	c	2,31	0,71	2400	2,16	0,55	1421	781	565	503
		a	2,36	0,74	3809	2,19	0,62	2361	769	459	516
	Nieuwerkerk Zuid arm	c	2,16	0,72	347	2,06	0,61	301	331	1187	109
		a	2,31	0,73	1030	2,16	0,66	834	350	1011	149
Rechter strook aansluiting hoofdtak turborotonde	Nieuwerkerk Noord arm	a	2,31	0,83	1213	2,11	0,74	796	343	459	516
	Nieuwerkerk Zuid arm	a	2,14	0,71	397	2,06	0,64	331	190	1011	149
Linker strook aansluiting zijtak turboronde	Rotterdam Oost arm	c	2,20	0,67	406	2,20	0,53	341	471	474	235
	Nieuwerkerk Oost arm	c	2,28	0,73	1561	2,20	0,71	1239	448	550	222
	Nieuwerkerk West arm	c	2,31	0,64	1130	2,16	0,56	841	430	424	174
Rechter strook zijtak, bruto (incl. verkeer binnenstrook)	Nieuwerkerk Oost arm ⁴⁷	c	2,74	0,85	648	2,74	0,82	551	588	607	239
		a	2,73	0,86	2,31	2,73	0,86	1649	478	669	245
	Nieuwerkerk West arm	a	2,91	0,93	117	2,91	0,89	101	101	534	232
Rechter strook zijtak netto (zonder verkeer binnenstrook)	Nieuwerkerk Oost arm	c	2,34	0,69	315	2,36	0,73	271	588	607	239
		a	2,36	0,74	1016	2,31	0,74	769	478	669	245
	Nieuwerkerk West arm	a	2,52	0,88	58	2,49	0,79	39	1,19	1,38	8

Tabel F.3.7 Schatting gemiddelde oprijvolgtijden volgens Hagring (1998)

Entry	Mean	Std.
Inner lane (Left lane Entry)	2,41 s/vtg	0,62
Outer lane (Right lane Entry)	2,39 s/vtg	0,62

⁴⁷ De uitkomst in Tabel F.3.6 dat op de rechter toeritstrook van de oosttak van de rotonde Nieuwerkerk de oprijvolgtijd bij congestie hoger is dan van het totaal, is opvallend. Dit wijst erop, dat in de perioden die als congestieperioden zijn aangemerkt er toch hiaten tussen hebben gezeten waarin de auto's op de toerit niet geheel aansloten. Zie ook F.4.6.

Conclusies oprijvolgtijd in detail

De beschouwing van de waarden in Tabel F.3.6 leidt tot de volgende opmerkingen:

- Op grond van de t-toets voor verschillen kan geconcludeerd worden dat de oprijvolgtijd van de enkelstrooksrotonde Bergschenhoek lager is dan die van Schipluiden $(2,10-1,80) = 0,3$ s. Mogelijk is er een verband met de grotere straal van de rijlijn bij het oprijden. De stuurtaak vraagt dan minder inspanning, resulterend in een kleinere oprijvolgtijd. Dit ondersteunt het vermoeden dat lagere snelheden op de rotonde tot een lagere waarde van het kritisch hiaat leiden, maar dat daarentegen rijcurven met een kleinere straal een verhogend effect lijken te hebben op de oprijvolgtijd.
- De oprijvolgtijd op de rotonde Papendrecht is met 2,45 (bruto) en 2,28 s/pae (netto) hoger dan op de rotonde Schipluiden. Op deze rotonde werd de waarde van de oprijvolgtijd duidelijk beïnvloed door het schijnconflict. Mogelijk heeft de mist versterkend gewerkt op de aarzeling bij het oprijden bij het zien van afslaande voertuigen. Verder waren de hiaten in de rotondestroom veelal zo groot, dat de oprijvolgtijd in hoge mate bepaald werd door het aansluitgedrag in de file op de toevoertak zelf.
- Behalve op de rotonde Papendrecht kon op enkelstrooksrotondes geen invloed van het schijnconflict op de oprijvolgtijd worden gemeten.
- De netto waarden van de oprijvolgtijd vanaf de linker toevoerstrook van de hoofdtak en vanaf de zijtak naar een turborotonde zijn minder dan 0,1 s/pae hoger dan die op een enkelstrooksrotonde met een diameter van 37 m. Maar de bruto waarden zijn 0,2 à 2,5 s/pae hoger. Vanaf deze toeritstroken naar turborotondes is het schijnconflict duidelijk van invloed op de oprijvolgtijd.
- Hetzelfde geldt voor de oprijvolgtijd vanaf de rechter strook van de hoofdtak.
- De oprijvolgtijd vanaf de rechter strook van de zijtak kent de hoogste waarden (2,7–2,9 s/pae). Ongetwijfeld heeft dat – wat eveneens het geval is bij het kritisch hiaat – te maken met het aantal (rotonde)stroken waarvan de oprijdende bestuurder moet bepalen of auto's die daarop rijden een mogelijk conflict vormen.
- Het verkeer op de binnenste rotondestrook heeft enige invloed op de oprijvolgtijd vanaf de rechter toeritstrook (0,2 s).
- De oprijvolgtijden zijn in Nederland niet kleiner dan in Zweden, in tegenstelling tot hetgeen het geval is bij de kritische hiaten.

F.4. Schatting parameters capaciteitsmodellen op stroomniveau

F.4.1. Schattingsprocedure algemeen

Hieronder wordt het principe van de geaggregeerde schattingsprocedure weergegeven voor de formule van Troutbeck^{CS}, waarin ten opzichte van de oorspronkelijke formule de factoren ρ , d en z met de correctieparameters δ en ψ zijn opgenomen. De laatste twee worden steeds aan het begin van een schattingsproces op de waarde = 1 gesteld.

$$\hat{C}_{Ep} = 3600 \cdot \delta \cdot z_p \cdot \rho \cdot q_{RS p} \cdot (1 - t_M \cdot q_{RS p}) \cdot \frac{e^{-\rho \cdot q_{RS p} (\psi \cdot t_C - t_M)}}{1 - e^{-\rho \cdot q_{RS p} \cdot \xi \cdot t_F}} \quad (f.9)$$

$$C_{Ep} = 3600 \sum_v g_v \cdot q_{Ev,p} \text{ in verzadigde situatie} \quad (f.10)$$

$$q_{Rp} = \sum_v g_v \cdot q_{Rv,p} \quad (f.11)$$

$$q_{Sp} = \sum_v g_v \cdot q_{Sv,p} \quad (f.12)$$

$$\varepsilon_p = C_{Ep} - \hat{C}_{Ep} \quad (f.13)$$

$$\lambda_{RSp} = \rho \cdot q_{RSp} \quad (f.14)$$

$$q_{RSp} = q_{Rp} + d \cdot q_{Sp} \quad (f.15)$$

$$z_p = \frac{1 - e^{-\lambda_{Rp} t_F}}{1 - e^{-\lambda_{Rp}(t_C - t_M)} - \lambda_{Rp}(t_C - t_M - t_F) e^{-\lambda_{Rp}(t_C - t_M)}} \text{ als } t_C - t_M - t_F < 0, \text{ anders } z = 1 \quad (f.16)$$

Dit stelsel vergelijkingen wordt aangeduid als Troutbeck^{CS}.

In de laatste fase van het schattingsproces wordt – voor zover de data het toelaten – de uitdrukking (f.15) vervangen door:

$$q_{RSp} = q_{Rp} + d_K \cdot q_{S1Kp} + d_H \cdot q_{S1Hp} + d_{HR} \frac{q_{R(K)p} \cdot q_{S1Hp}}{q_{R(K)p} + q_{S1Hp}} \quad (f.17)$$

Dan wordt het stelsel vergelijkingen aangeduid als Troutbeck^{CKHR}.

Hierin is:

- $\hat{C}_{Ep}$: geschatte capaciteit van de (linker) toerit(strook) in (vijfminuten-)periode p [pae/h]
 - C_{Ep} : omgerekende toerit-intensiteit van de (linker) toerit(strook) in verzadigde toestand in periode p uitgedrukt in personenauto-eenheden per uur [pae/h]
 - g_v : pae-waarde voor voertuigsoort v ; voor $v=1$ is per definitie $g_{E,1}=1$
 - p : index voor een periode van ca 5 minuten.
 - $q_{Ev p}$: gemeten toerit-intensiteit van voertuigtype v in periode p , uitgedrukt in [vtg/s]
 - q_{Rp} : rotonde-intensiteit inclusief in personenauto-equivalenten [pae/s]
 - q_{SKp} : intensiteit van afslaand verkeer afkomstig van de tak die een kwart segment voor de toerit ligt [pae/s]
 - q_{SHp} : intensiteit van afslaand verkeer afkomstig van het rotondesegment gelegen voor de voorliggende aansluitak (een half cirkelsegment voor de toerit) in periode p [pae/s]
 - q_{RKp} : intensiteit van rotondeverkeer afkomstig van de tak die een kwart segment voor de toerit ligt in periode p [pae/s]
 - z_p : correctiefactor voor de invoegverstoring in periode p
- Voor de overige symbolen wordt verwezen naar de paragraaf 5.2.8.

In Troutbeck^{CKHR} (en Hagring^{CKHR}) wordt onderscheid gemaakt tussen verkeer afkomstig van de voorliggende aansluitak en het daarvoor gelegen rotondesegment. Minimalisering van de kwadratenmethode van de residuen ($\sum_p \varepsilon_p^2$) leidt tot een schatting van de parameters (kleinste kwadratenmethode).

De schattingen zijn op verschillende wijzen uitgevoerd:

- a) Op de enkelstrooksrotonde Schipluiden laten de data het toe om op stroomniveau de parameters simultaan te schatten. Daardoor was het mogelijk onderzoek te doen naar de invloed van pae-waarden en het schijnconflict in de verschillende modellen. Voor de turbortondes bleek dat niet mogelijk, vanwege het grote aantal parameters. Door

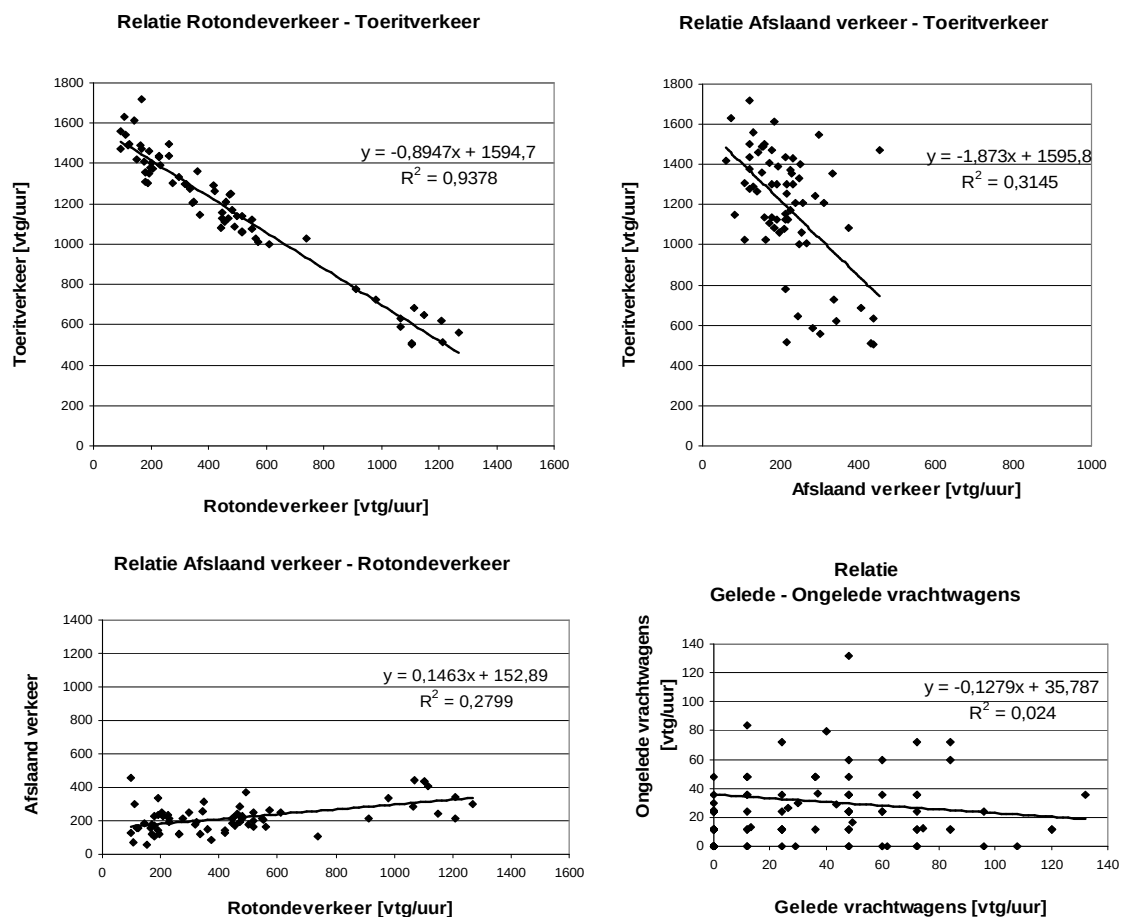
achtereenvolgens verschillende startwaarden te gebruiken is de stabiliteit van de uitkomsten voor de verschillende capaciteitsmodellen onderzocht.

- b) De simultane capaciteitsschattingen leiden tot waarden van de parameters van de hiaatacceptatie-modellen die afwijken van wat is gevonden met de geëigende hiaatacceptatie schattingsmethodieken. Daarom was het nodig om via een stapsgewijze benadering inzicht te verkrijgen in de aard van de afwijkingen. De berekeningen waarin in stappen exogene parameterwaarden worden ingevoerd, worden in het vervolg aangeduid als sequentiële schattingen.

F.4.2. Parameters enkelstrooksrotonde op stroomniveau

Correlaties tussen variabelen

De data van de rotondes Bergschenhoek en Papendrecht strekken zich over een te klein waardebereik uit om op grond daarvan een capaciteitsmodel op stroomniveau te kunnen schatten. Alleen de data van de rotonde Schipluiden zijn hiervoor gebruikt. Figuur F.4-1 brengt de onderlinge afhankelijkheid van de verschillende variabelen in beeld.



Figuur F.4-1 *Correlatie variabelen onderzoek rotonde Schipluiden*

Resultaten capaciteitsschattingen enkelstrooksrotonde

Simultane schatting

De simultane schattingen zijn uitgevoerd voor alle parameters:

- de pae-waarden voor ongelede vrachtauto's (g_2) en gelede vrachtauto's (g_3);
- de waarde d voor het schijnconflict;
- en de overige parameters per model.

Dit is gedaan voor de volgende modellen: Bovy in zijn oorspronkelijke vorm en de modellen van Siegloch (Brilon-Stuwe)^S, Tanner^S en Troutbeck^S in aangepaste vorm (voor het schijnconflict). De resultaten zijn voor alle modellen weergegeven in Tabel F.4.1.

Tabel F.4.1 Resultaten van de eerste fase van het schattingsproces op stroomniveau

Parameter	Resultaten simultane schattingen rotonde Schipluiden					
	Zonder invoegverstoring					
	Bovy ^T	Siegloch	Tanner ^{CS}	Troutbeck ^{CS}		
ϕ	-	-	$\phi = 1 - t_M \cdot q_R$	ϕ waargenomen met	$\phi = \rho(1 - t_M \cdot q_R)$	$\phi = a - b \cdot q_{RS}$
Pae ongelede vrachtw. (g_2)	1,62	1,94	1,74	1,71	instabiel	instabiel
Pae gelede vrachtw	2,62	2,21	2,32	2,40		
C_0 ^{*)}	1627	1767	(1708)	(1694)		
Bovy: b ;	0,86		-	-		
t_M [s/pae]	-		1,38	1,19		
t_C [s/pae]	-	4,10	3,58	3,69		
t_F [s/pae]	-	2,04	2,11	2,12		
$d (= a/b)$	(0,26)	0,29	0,30	0,22		
a (in Bovy)	0,22	-	-	-		
kwadratensom	3451	320613	314017	294446		
spreadings s [pae/h]	71,8	69,2	68,5	66,3		

^{*)} geminimaliseerd in doelfunctie

^{*)} De afgeleide waarden zijn tussen haakjes geplaatst.

Het bleek onmogelijk om met de beschikbare dataset parameters voor het aandeel ongeclusterde voertuigen (ϕ) in het model van Troutbeck simultaan mee te schatten. Door het grote aantal variabelen werd het proces dan instabiel.

Overige conclusies:

- Opvallend is, dat de waarde voor het kritisch hiaat in alle modellen veel hoger is, dan de uitkomsten die via de schattingen op basis van hiaatwaarnemingen zijn verkregen.
- De formule van Troutbeck, gebaseerd op waargenomen aandelen vrij verkeer (met als criterium volgtijd $h > 2$ s) geeft de beste fit, maar die van het model van Tanner doet daar niet veel voor onder.
- Als de resultaten van Tanner en Troutbeck met elkaar vergeleken worden, lijkt er sprake te zijn van een uitwisseling tussen de waarden van ($t_C - t_M$) enerzijds en d anderzijds. De correlatie tussen afslaand verkeer en rotondeverkeer met $R^2 = 0,28$ is daar debet aan.
- De verfijningen door toevoeging van de factor z voor de invoegverstoring heeft in de simultane schatting geen effect, omdat in dit schattingsresultaat $t_C - t_M - t_F > 0$ is (terwijl dat op grond van de hiaatmetingen niet het geval is).

Invulling van de resultaten voor t_C en t_F uit de hiaatmetingen in de capaciteitsmodellen levert een te hoge schatting van de capaciteit. Als de overige parameters dan worden vrijgelaten, levert dat een onrealistische invloed van schijnconflict op van ca. 50% (Fortuijn, 2009b).

De oorzaak van dit verschil in uitkomsten kan zijn gelegen in één van de volgende factoren of de combinatie ervan:

- een mogelijke afwijking van de hiaatverdeling van de rotondestroom (geen M3verdeling);
- het niet-homogeen zijn van de bestuurders ten aanzien van de hiaatacceptatie die een onderschatting van de waarde oplevert die gevonden wordt met de likelihood schatting;
- een resultaat uit de simultane schatting die toevallig een te lage waarde voor t_M oplevert.

Sequentiële schatting

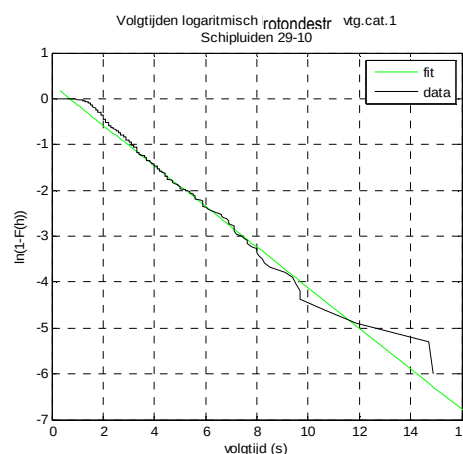
Tabel F.4.2 Sequentiële schatting gebaseerd op stroomwaarnemingen en gebruikmakend van parameterschattingen uit hiaatwaarnemingen

Troutbeck ^{CS} met $\varphi = \rho (1 - t_M \cdot q_{RS})$ $d = 0,26$						
Pae 1	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90
Pae2	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
t_M	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80
t_C	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10
t_F	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10
d	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
ρ	1,551	1,506	1,428	1,296	1,000	0,634
δ	1,009	1,004	0,998	0,992	0,982	0,979
kwadratensom	324370	323629	323897	325629	330064	336099
spreiding s [pae/h]	70,6	70,6	70,6	70,8	71,3	71,9

In het schattingsproces vastgezette waarden; geminimaliseerd in doelfunctie

Overige conclusies uit Tabel F.4.2:

Figuur F.4-2 Verdeling volgtijden op de rotonde Schipluiden



- 1) Een waarde van $t_M = 1,4$ s/pae leidt tot een schatting met de laagste kwadratensom van de residuen. De algemene correctiefactor is dan afgerond $\delta = 1$. De waarde van de clusteringfactor $\rho = 1,5$ zou er echter op duiden dat het ongeclusterde verkeer in het geheel niet ad random aankomt. Hiervoor zijn geen aanwijzingen. Zie Figuur F.4-2. Alleen lijken hiaten groter dan 12 seconden wat ondervertegenwoordigd.

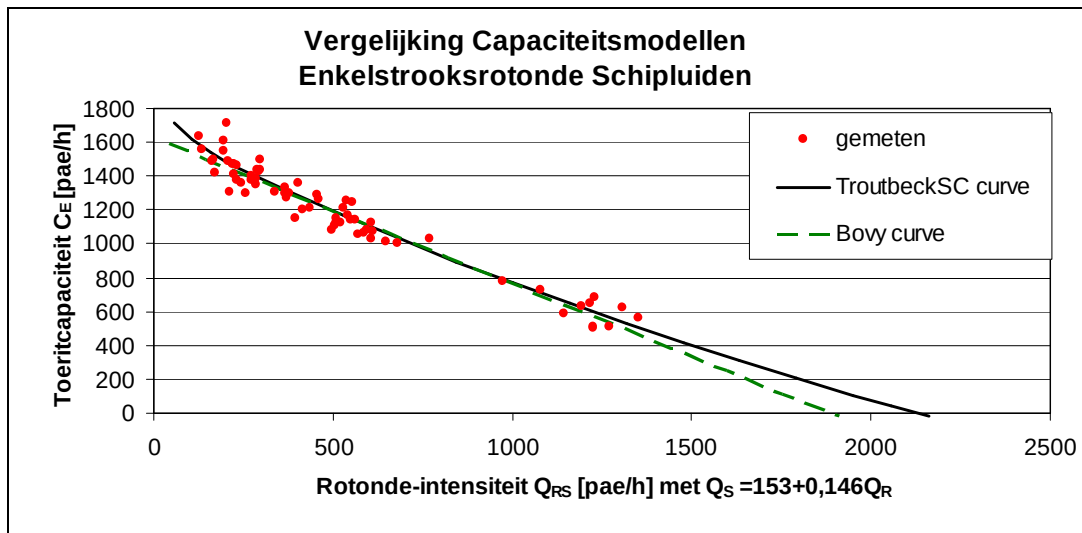
- 2) Wanneer uitgegaan wordt van een ‘Tannerverdeling’ ($\rho = 1$), bedraagt de minimum volgtijd $t_M = 1,7$ s/pae⁴⁸. Het gecorrigeerde model van Troutbeck^{CS} (is met $\rho = 1$ het model van Tanner^{SC}) doet het redelijk goed. In dat geval is de algemene correctiefactor $\delta = 0,98$, terwijl de spreiding van het schattingsresultaat met $s = 70,2$ pae/h slechts 0,7 pae/h hoger is dan de minimale spreiding van $s = 69,5$ pae/h in Tabel F.4.2. Dit resultaat, is altijd nog beter dan het resultaat van de parameterschatting voor het model van Bovy met een spreiding van $s = 71,8$ pae/h (zie Tabel F.4.1; niet getoond is, dat bij de gekozen pae-waarden het model van Bovy een spreiding $s = 72,5$ s/pae heeft, met een waarde van $C_0 = 1656$ pae/h).
- 3) In paragraaf 5.4.1 is al opgemerkt dat er vanuit de literatuur geen methoden beschikbaar zijn waarmee de waarde van t_M eenduidig kan worden bepaald. Vanwege de relatieve eenvoud van het model van Tanner^{CS} ligt een keuze daarvoor voor de hand, met een minimum volgtijd $t_M = 1,7$ s/pae, onder toepassing van een algemene correctiefactor $\delta = 0,98$.

Tabel F.4.3 Resultaat schattingen parameters enkelstrooksrotonde Tanner^{CS}

Oorspronkelijk onderzoek			Toegevoegd na aanpassing parameters schijnconflict met de gegevens van de turborotondes
Pae ongeleed	1,90	1,90	1,90
Pae geleed	2,70	2,70	2,70
t_M	1,70	1,70	1,70
t_C	3,16	3,17	3,20
t_F	2,10	2,13	2,13
d	0,26	0,26	$d_K = 0,22$
d_H			0,12
d_{HR}			-0,13
ρ	1,000	1,000	1,000
δ	0,987	1,000	1,000
kwadratenom	329.143	329.173	330.595
spreading (afgekort tot s)	71,2	71,2 pae/h	71,3 pae/h
spreading Bergschenhoek oost			71,2 pae/h (niet in kwadraatsom)
spreading Bergschenhoek noord			81,1 pae/h (niet in kwadraatsom)

Opmerking bij Tabel F.4.3. De algemene correctiefactor δ hangt het sterkst samen met de waarde van de oprijvolgtijd t_F . Schattingen waarin zowel t_F als δ worden vrijgelaten, zijn instabiel. Verder blijkt, dat i.p.v. δ ook hogere waarden van het kritisch hiaat en de oprijvolgtijd kunnen worden gebruikt. De laatste kolom is toegevoegd nadat de schattingen op basis van de gegevens van de turborotondes tot aanpassing van de functie voor het schijnconflict hebben geleid (zie F.4.3 en F.4.4). Ook zijn de kwadraatsommen toegevoegd op basis van de capaciteitsmetingen van de rotonde Bergschenhoek. Daarbij is aangenomen dat afslaand verkeer naar de oosttak afkomstig is van de voorliggende zuidtak en dat naar de noordtak vanaf het voorliggende rotondesegment (de relatie Berkel - Bergschenhoek gebruikte voornamelijk de Berkelseweg i.p.v. de Boterdorpseweg).

⁴⁸ Er is ook een berekening uitgevoerd met $g_2 = 1,7$ en $g_3 = 2,4$. Als dan de waarden $t_C = 3,15$ en $t_F = 2,15$ s/pae worden ingevuld, wordt ook $t_M = 1,7$ s/pae gevonden bij een $\delta = 0,987$. De waarde van t_M is kennelijk niet sterk afhankelijk van de gebruikte pae-waarden.

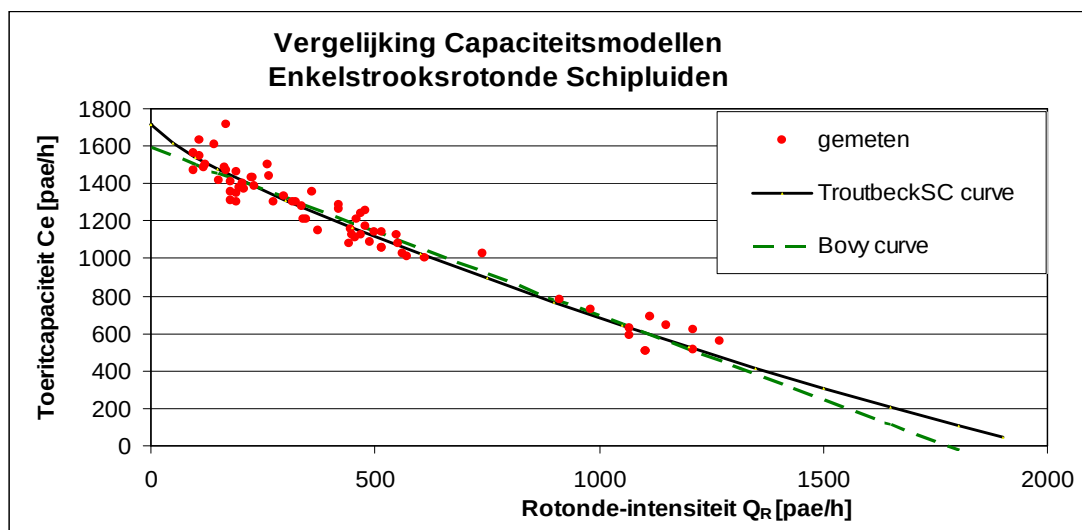


Figuur F.4-3 Grafische weergave vergelijking aangepast model van Troutbeck^{CS} en model van Bovy: Q_E uitgezet tegen Q_{RS}

Opmerkingen bij Figuur F.4-3.

- Horizontaal is de rotonde-intensiteit inclusief het schijnconflict uitgezet. Omdat de horizontale as in werkelijkheid tweedimensionaal is (rotondeverkeer en afslaand verkeer), zijn de curven alleen met de waarnemingen vergelijkbaar als bij het berekenen van de fucntiewaarden uitgegaan wordt van dezelfde verhouding tussen afslaand verkeer en rotondeverkeer. Zoals uit Figuur F.4-1 blijkt, kan die relatie goed benaderd worden met $Q_S = 153 + 0,146 Q_R$. Dat is ingevoerd.
- Ook optisch sluit de curve van Troutbeck^{CS} (spreiding $s = 70,1$ pae/h) iets beter aan bij de waarnemingen dan die van Bovy ($s = 72,5$ pae/h), maar het verschil is marginaal.

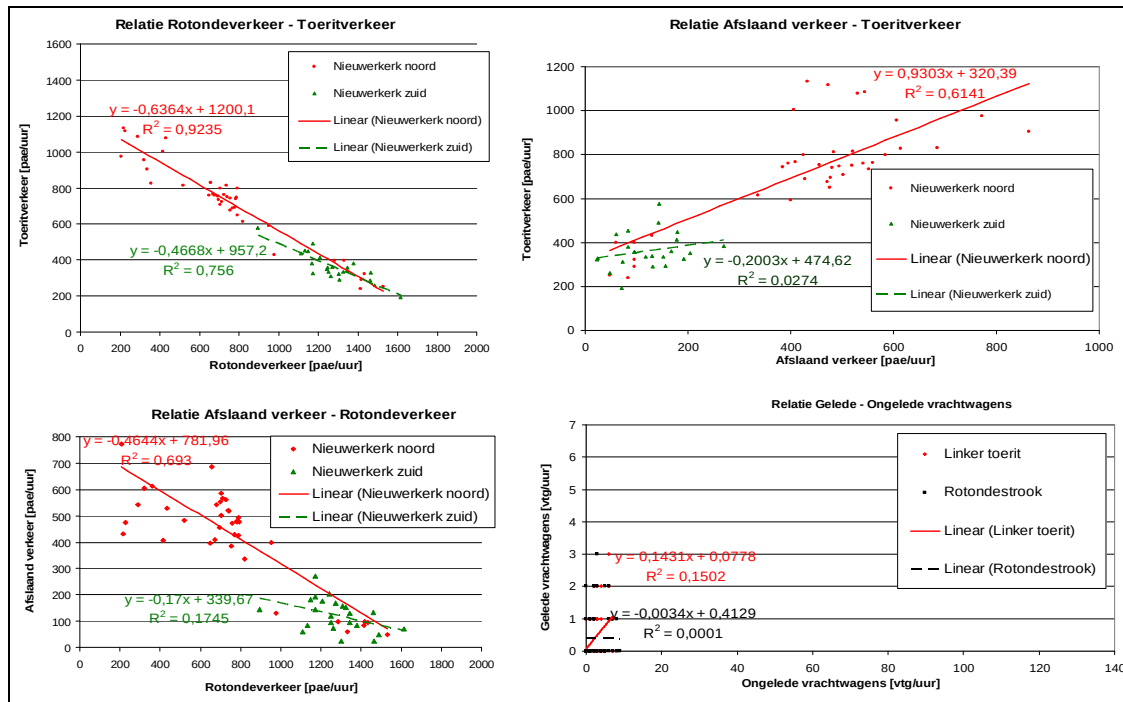
In Figuur F.4-4 is de toeritcapaciteit uitgezet tegen uitsluitend de rotondestroom Q_R .



Figuur F.4-4 Vergelijking aangepast model van Troutbeck^{CS} en model van Bovy: punten Q_E uitgezet tegen Q_R

F.4.3. Parameters linker toeritstrook hoofdtak turborotonde op stroomniveau

Correlaties tussen variabelen



Figuur F.4-5 *Correlatie variabelen linker toeritstrook naar enkelstrookssegment turborotonde (hoofdtakken Nieuwerkerk noord en zuid)*

Toelichting op Figuur F.4-5

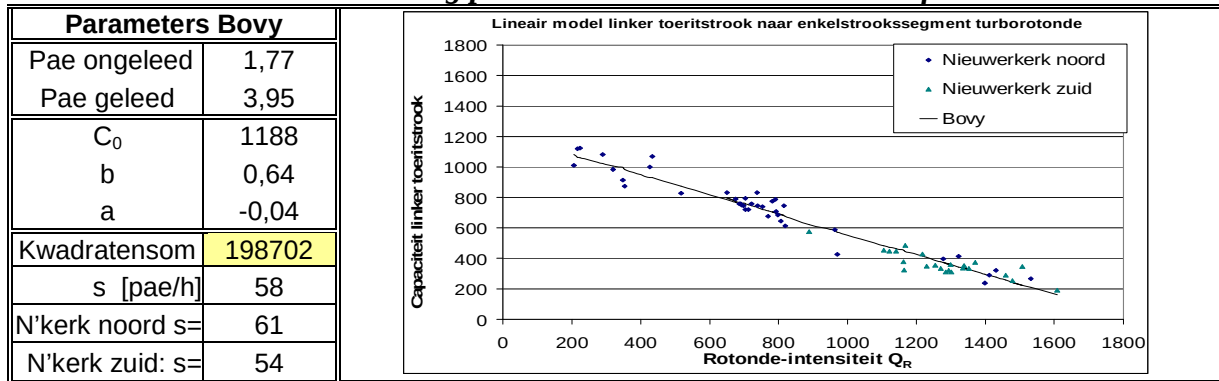
Van de hoofdtak naar de turborotonde zijn uitsluitend capaciteitsmetingen van de linker toeritstrook beschikbaar. Figuur F.4-5 betreft zowel de noordelijke als zuidelijke hoofdtak.

- De relatie tussen toeritverkeer en rotondeverkeer is voor beide aansluitakken evident.
- Voor de noordtak is er een duidelijke (positieve!) relatie tussen afslaand verkeer en toeritverkeer. Daarbij moet overwogen worden, dat het afslaand verkeer vanaf de voorliggende zijtak merendeels gebruik maakt van de buitenste afritstrook (S2) en niet van de linker afritstrook (S1), zodat het afslaand verkeer op S1 afkomstig is van het voorliggende rotundesegment (Q_{SIH}). Nader onderzoek is nodig of er mogelijk een verschil bestaat in het effect van de herkomst van het afslaand verkeer: $\frac{1}{4}$ of $\geq \frac{1}{2}$ deel van de rotonde (Q_{SIK} c.q. Q_{SIH}). Alleen van de zijtak van de rotonde Rotterdam zijn data beschikbaar waarin dit onderscheid is gemaakt.
- Opvallend is een sterke negatieve relatie tussen rotondeverkeer en afslaand verkeer, ter plaatse van de noordelijke toerit ($R^2=0,69$). Ook dit hangt met het voornoemde samen: het afslaand verkeer dat een schijnconflict oplevert is voornamelijk afkomstig vanaf het voorliggend rotundesegment. Dat verhindert het oprijden van verkeer vanaf de voorliggende tak.
- Ter plaatse van de zuidelijke tak is dat verschijnsel niet in een sterke correlatie terug te zien, aangezien het relatieve aandeel van het afslaand verkeer dat afkomstig is van het voorliggend rotundesegment kleiner is (het grootste deel van het verkeer vanaf dat segment blijft de rotonde vervolgen i.v.m. de keerbeweging).

Capaciteitsschattingen lineair model hoofdtak turborotonde

Gestart is met het simultaan schatten van de parameters in het lineaire model Bovy voor de linker toeritstrook van de hoofdtak (naar enkelstrooks rotondesegment). Zie Tabel F.4.4.

Tabel F.4.4 Simultane schatting parameters linker toeritstrook hoofdtak turborotonde



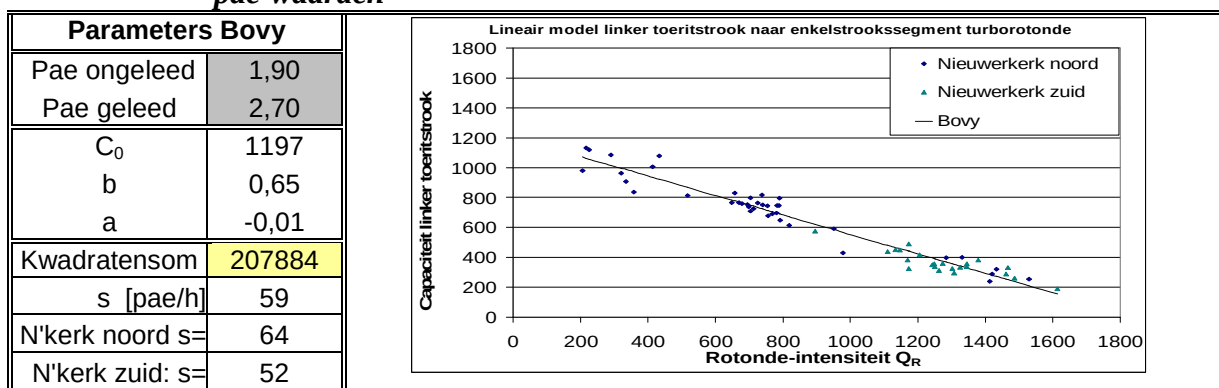
Enkele zaken vallen in dit resultaat op:

- de pae-waarde van gelede vrachtwagens is onwaarschijnlijk hoog, terwijl die van de ongelede vrachtwagens aan de lage kant is. De determinatiecoëfficiënt $R^2 = 0,15$ tussen beide voertuigsoorten op de toeritstroken kan daar debet aan zijn.
- de C_0 -waarde verhoudt zich niet tot die van de enkelstrooksrotonde naar rato van de gevonden waarden voor de oprijvolgtijd. Als dat wel het geval was, zou een waarde voor $C_0 \approx 1500$ pae/h gevonden zijn;
- de invloed van het schijnconflict is tegengesteld aan wat is gevonden bij de enkelstrooksrotonde.

In de volgende stappen wordt gebruik gemaakt van vaste pae-waarden.

De volgende stap in het proces is weergegeven in Tabel F.4.5.

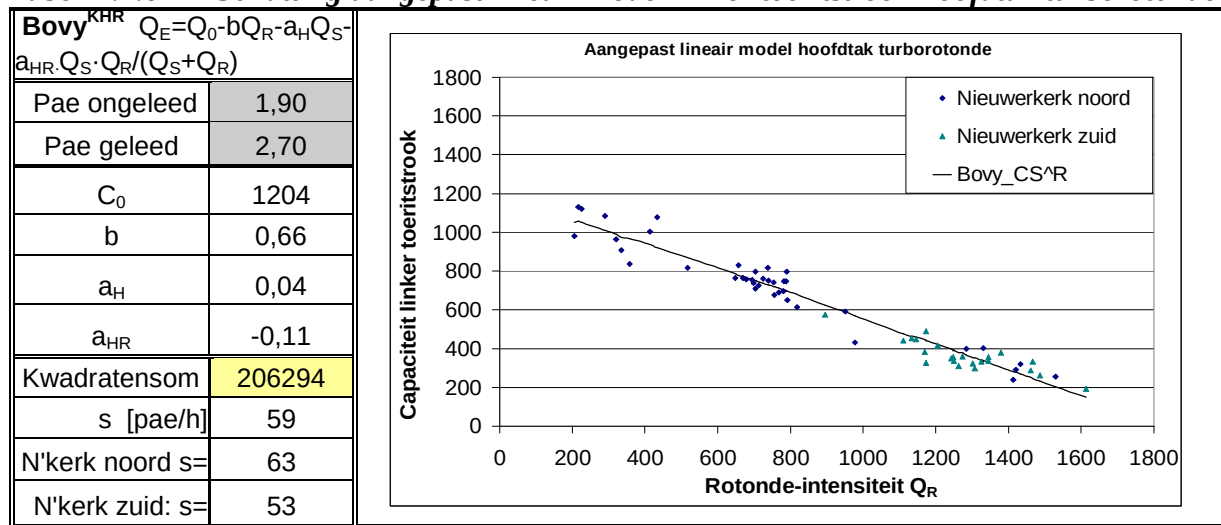
Tabel F.4.5 Schatting parameters linker toeritstrook hoofdtak turborotonde met exogene pae-waarden



Toelichting op Tabel F.4.5 Het feit dat het afslaand verkeer eerder een positief dan een negatief effect op de toeritcapaciteit van de linker toeritstrook van de hoofdtak lijkt te hebben, kan mogelijk zijn verklaring vinden in het feit, dat dit verkeer op de linker rijstrook van de afrit (strook S1) voornamelijk afkomstig is van het rotondesegment voor de voorliggende aansluitak. Dit verkeer zorgt ervoor, dat verkeer vanaf de voorliggende aansluitak niet kan

oprijden. Dit kan worden benaderd door de uitdrukking $(Q_{R(K)} \cdot Q_{S1H}) / (Q_{R(K)} + Q_{S1H})$ als extra verklarende variabele op te nemen. Het resultaat is weergegeven in Tabel F.4.6.

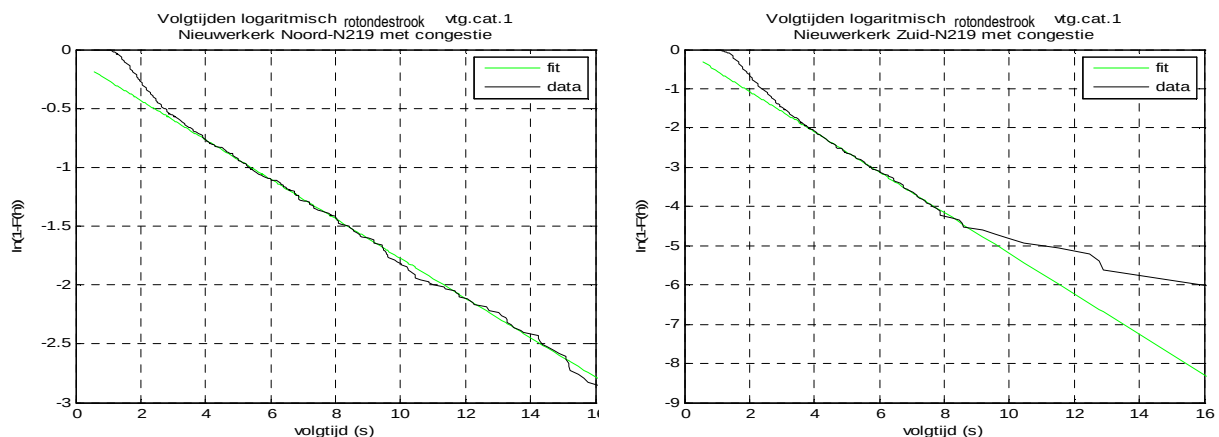
Tabel F.4.6 Schatting aangepast lineair model linker toeritstrook hoofdtak turborotonde



Dit resultaat lijkt bovengenoemde hypothese te ondersteunen. Helaas is dit niet verder te onderzoeken met behulp van de data van de enkelstrooksrotonde Schipluiden, omdat het afslaand verkeer daarin niet is te onderscheiden naar verkeer afkomstig van de voorliggende toerit en van het daarvoor gelegen rotondesegment.

Capaciteitsschattingen model Troutbeck^{CS} hoofdtak turborotonde

In Figuur F.4-6 zijn de cumulatieve frequentieverdelingen op de rotondesegmenten tegenover beide rotondestroken uitgezet. Hieruit blijkt dat in het rotondeverkeer tegenover de zuidtak grote hiaten ondervertegenwoordigd zijn.



Figuur F.4-6 Negatief cumulatieve frequentieverdelingen verkeer rotondestroken Nieuwerkerk noord- en zuidtak

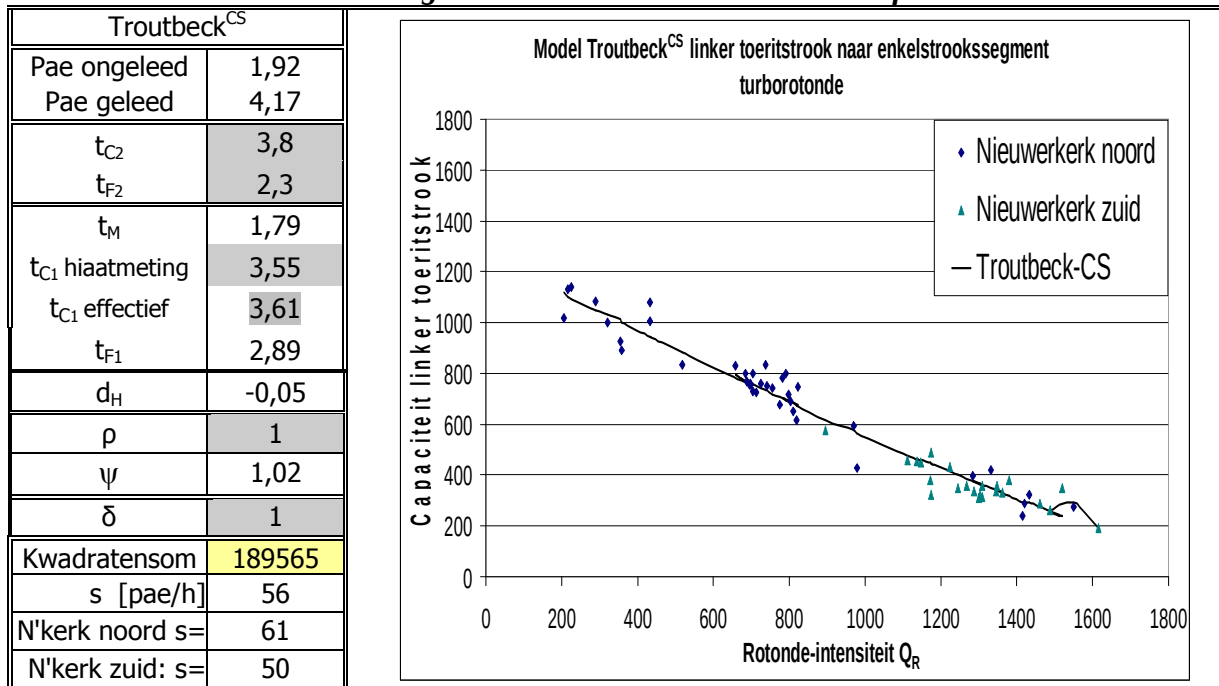
In verband met de waardebeoordeling van z_2 is het nodig om bij voorbaat de waarden voor het kritisch hiaat en de oprijvolgtijd van de rechter toeritstrook in te vullen. Hiervoor zijn op grond van Tabel F.3.1 en Tabel F.3.6 de waarden $t_{C2} = 3,8$ en $t_{F2} = 2,3$ s/pae gekozen.

Gestart is met het simultaan schatten van de standaardformules van Tanner (= model Troutbeck^{SC} met de algemene correctiefactor $\delta=1$ en de clusteringconstante $\rho=1$) voor de linker toeritstrook van de hoofdtak. Tabel F.4.7 laat zien, dat de afwijkingen van wat is berekend uit de gedragswaarnemingen voor t_C relatief klein zijn (3,61 versus 3,55). Kennelijk is het effect van de geconstateerde onregelmatigheid in Figuur F.4-6 gering.

Echter, voor t_F is de afwijking wel substantieel (2,89 versus 2,30).

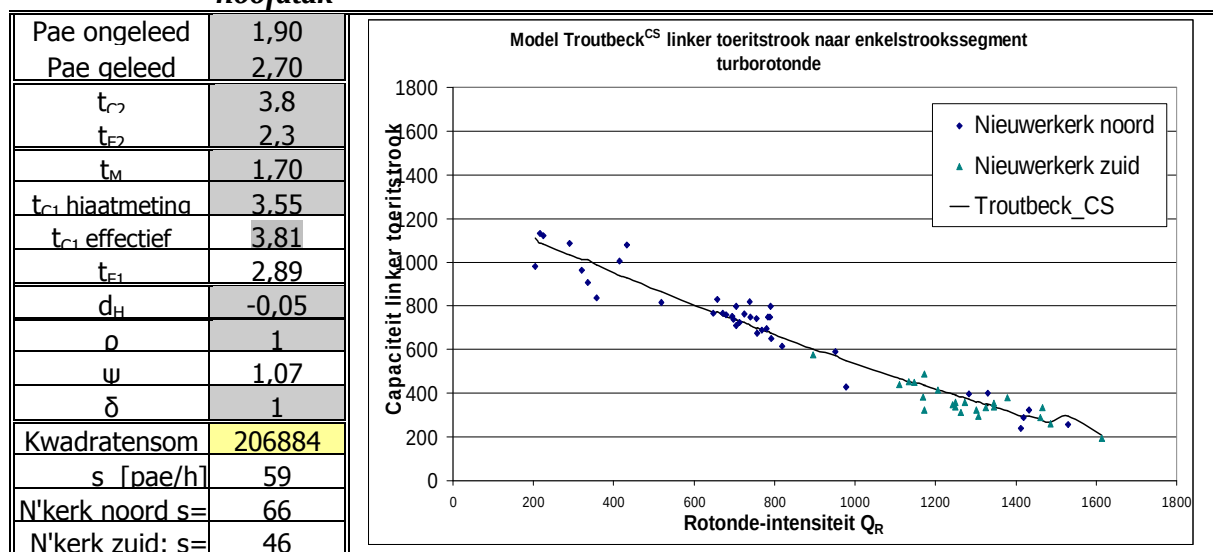
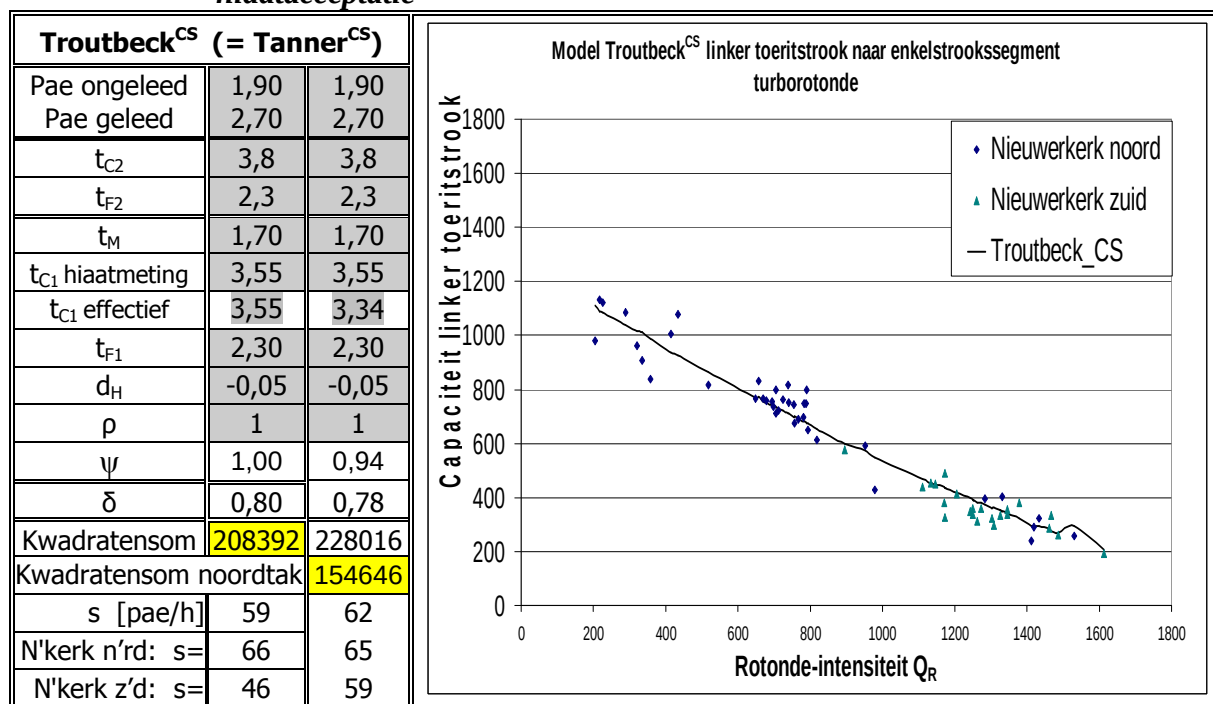
De waarde van de minimum volgtijd t_M ligt relatief dicht bij de waarde $t_M = 1,7$ s/pae, die bij de enkelstrooksrotonde als resultaat is gevonden. Evenals bij het lineaire model is de pae-waarde voor de gelede vrachtwagen onrealistisch hoog. En ook in dit resultaat wordt eerder een positieve dan een negatieve invloed van het schijnconflict gevonden.

Tabel F.4.7 Simultane schatting model Tanner^{CS} linker strook hoofdtak



Wanneer de pae-waarden 1,9 pae/vtg₂ en 2,7 pae/vtg₃ worden ingevuld en voor $t_M = 1,7$ s/pae en $d = -0,05$, worden de waarden van Tabel F.4.8 gevonden.

Omdat uit Figuur F.4-6 op de rotonde tegenover de zuidelijke tak een ondervertegenwoordiging van grote hiaten blijkt, is een onderzoek gedaan naar de mate waarin de clusteringconstante ρ mogelijk afwijkt van 1. Wanneer dat voor alle waarnemingen wordt gedaan, leidt dit tot een $\rho = 2,79$ met $t_{C1} = 3,13$ s/pae, maar met $t_{F1} = 3,12$ s/pae. Dit zijn geen bruikbare uitkomsten; de oprijvolgtijd heeft een onrealistisch hoge waarde, terwijl de t_{C1} met 3,13 s/pae lager is dan uit de hiaatwaarnemingen volgt. Wanneer deze exercitie wordt gedaan met een vaste waarde $t_{F1} = 2,89$ s/pae, levert dat een waarde op van $\rho = 1,76$ bij een $t_{C1} = 3,42$ s/pae wanneer alle data worden gebruikt en $\rho = 0,94$ bij een $t_{C1} = 3,77$ s/pae wanneer alleen de data van de noordtak worden gebruikt. Wanneer hetzelfde gedaan wordt op alleen de data van de zuidtak levert dit echter een volstrekt onbruikbaar resultaat op ($\rho = 0,11$ bij een $t_{C1} = 11,91$ s/pae). De conclusie is, dat de data het niet toelaten om over de ρ een uitspraak te doen. Omdat er geen reden bestaat uit te gaan van een bovenproportionele clustering op de noordtak, is een $\rho = 1$ aannemelijk (model Troutbeck^{CS} = Tanner^{CS}).

Tabel F.4.8 *Sequentiële schatting model Tanner^{CS} met vaste pae-waarden linker strook hoofdtak***Tabel F.4.9** *Sequentiële schatting model Tanner^{CS} linker strook hoofdtak met parameters hiaatacceptatie*

In Tabel F.4.9 is dit uitgevoerd, waarbij de ene keer de afwijkingen ten opzichte van alle waarnemingen en de andere keer ten opzichte van die van de noordelijke tak zijn geminimaliseerd. Omdat in het resultaat van de schatting op grond van alle data de algemene correctiefactor δ en de correctiefactor voor het kritisch hiaat ψ minder afwijken van 1 dan op grond van alleen de data van de noordtak, verdient het gebruik van data van beide takken samen de voorkeur.

Ten slotte is onderzocht wat met deze set parameters het effect is van het opsplitsen van de invloed van de parameter voor het schijnconflict d_H in een lineair- en in een product-gerelateerd deel. Zie vergelijking (f.17) op blz. 288 –vergelijking (4.34) – in de hoofdstekst. Uit *Tabel F.4.10* blijkt dat er een grote interactie bestaat tussen parameter d_H en d_{HR} enerzijds en de hoofdparameters van het model t_{C1} (ψ) en t_{F1} (δ) anderzijds. Bij introductie van parameter d_{HR} wordt weliswaar de kwadraten som kleiner, maar gaan de parameters δ en ψ meer afwijken van 1.

Bij introductie van de uitdrukking $d_{HRi} \cdot \frac{q_{R(K)} \cdot q_{S1H}}{q_{R(K)} + q_{S1H}}$ lijkt het dus nodig om in een exponentieel model de parameterwaarden d_H en d_{HR} onderling en in relatie met ψ te begrenzen. In de laatste kolom van *Tabel F.4.10* is dat gedaan met de uitdrukking $d_{HR} = -1,5 \cdot d_H$ en door $\psi = 1$ te hanteren.

Tabel F.4.10 Onderzoek naar de mogelijkheid tot opsplitsing van de parameter voor het afslaan van verkeer vanaf het voorliggend rotondesegment

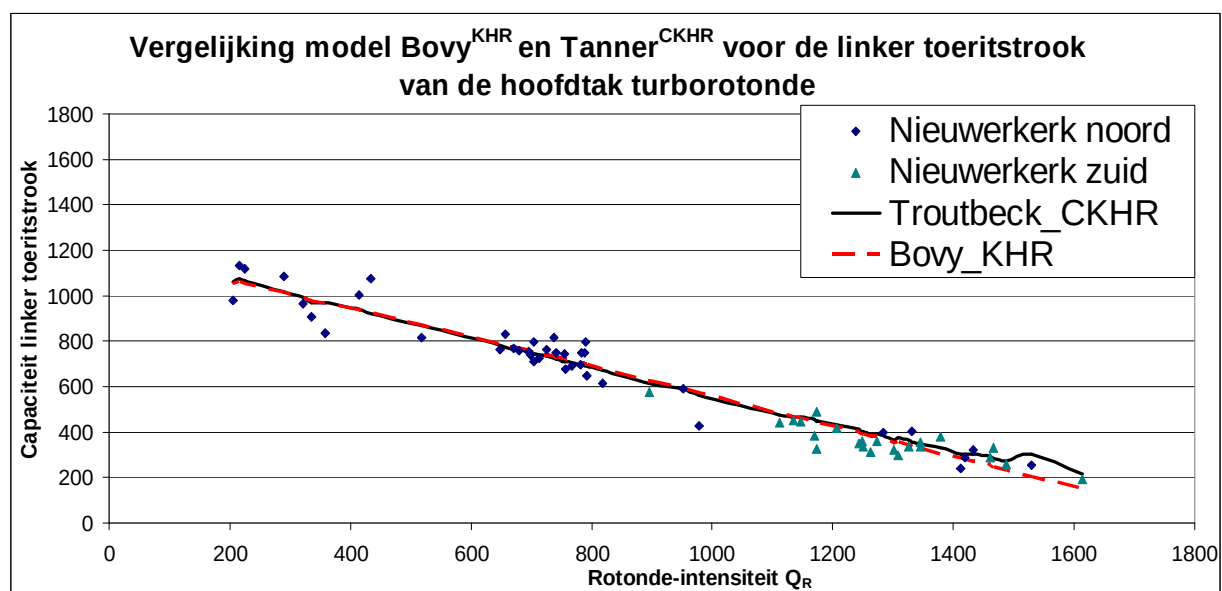
Troutbeck^{CKHR}							
Pae ongeleed	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90
Pae geleed	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
t_{C2}	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
t_{F2}	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
t_M	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70
t_{C1} hiaatmeting	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55
t_{F1}	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30
d_H	-0,05	-0,07	0	0,37	0,00	0,11	0,10
d_{HR}	0	0	-0,43	-0,85	-0,13	-0,30	$-1,5 \cdot d_H$
ρ	1	1	1	1	1,00	1,00	1,00
ψ	1,00	1,00	1,04	1,17	1,00	1,00	1,00
δ	0,80	0,79	0,76	0,88	0,80	0,80	0,82
Kwadraten som	208392	208316	188131	166275	200616	197828	206504
s [pae/h]	59	59	56	53	58	57	59
N'kerk noord s=	66	67	62	57	64	61	63
N'kerk zuid: s=	46	46	46	47	49	53	52

Verder onderzoek naar de waarden is mede verricht door ook de uitkomsten van de schattingen van de zijtak te betrekken. Uiteindelijk is –arbitrair– gekozen voor de combinatie $d_K = 0,22$, $d_H = 0,12$ en $d_{HR} = -0,13$

Ter afsluiting van deze paragraaf zijn de uitkomsten van het lineaire model Bovy vergeleken met het exponentiële model Tanner^{CKHR}. De gebruikte parameterwaarden van beide modellen zijn weergegeven in *Tabel F.4.11*. Het verschil tussen beide modellen is marginaal. Ook is het verschil tussen de directe schatting van t_{F1} of die via de algemene correctiefactor δ verwaarloosbaar.

Tabel F.4.11 Gebruikte parameterwaarden in de vergelijking model Bovy^{KHR} en Tanner^{CKHR} voor linker toeritstrook hoofdtak turbortonde

Bovy ^{KHR}		Troutbeck ^{CKHR}		
Pae ongeleed	1,90	Pae ongeleed	1,90	1,90
Pae geleed	2,70	Pae geleed	2,70	2,70
		t_{C2}	3,8	3,8
		t_{F2}	2,3	2,3
		t_M	1,70	1,70
		t_{C1} hiaatacceptatie	3,55	3,55
		t_{F1} hiaatmeting	2,30	2,30
b	0,66	t_{C1} effectief	3,75	3,91
C_0	1204	t_{F1} effectief	2,67	2,67
a_k	-	d_{SK}	-	-
a_H	0,04	d_{SH}	0,12	0,12
a_{HR}	-0,11	d_{HR}	-0,13	-0,13
		ρ	1,00	1,00
		ψ	1,06	1,10
		ξ	-	1,16
		δ	0,86	1
Kwadratensom	206294	Kwadratensom	202226	201484
s [pae/h]	59	s [pae/h]	58	58
N'kerk noord s=	63	N'kerk noord s=	65	65
N'kerk zuid: s=	53	N'kerk zuid: s=	47	47

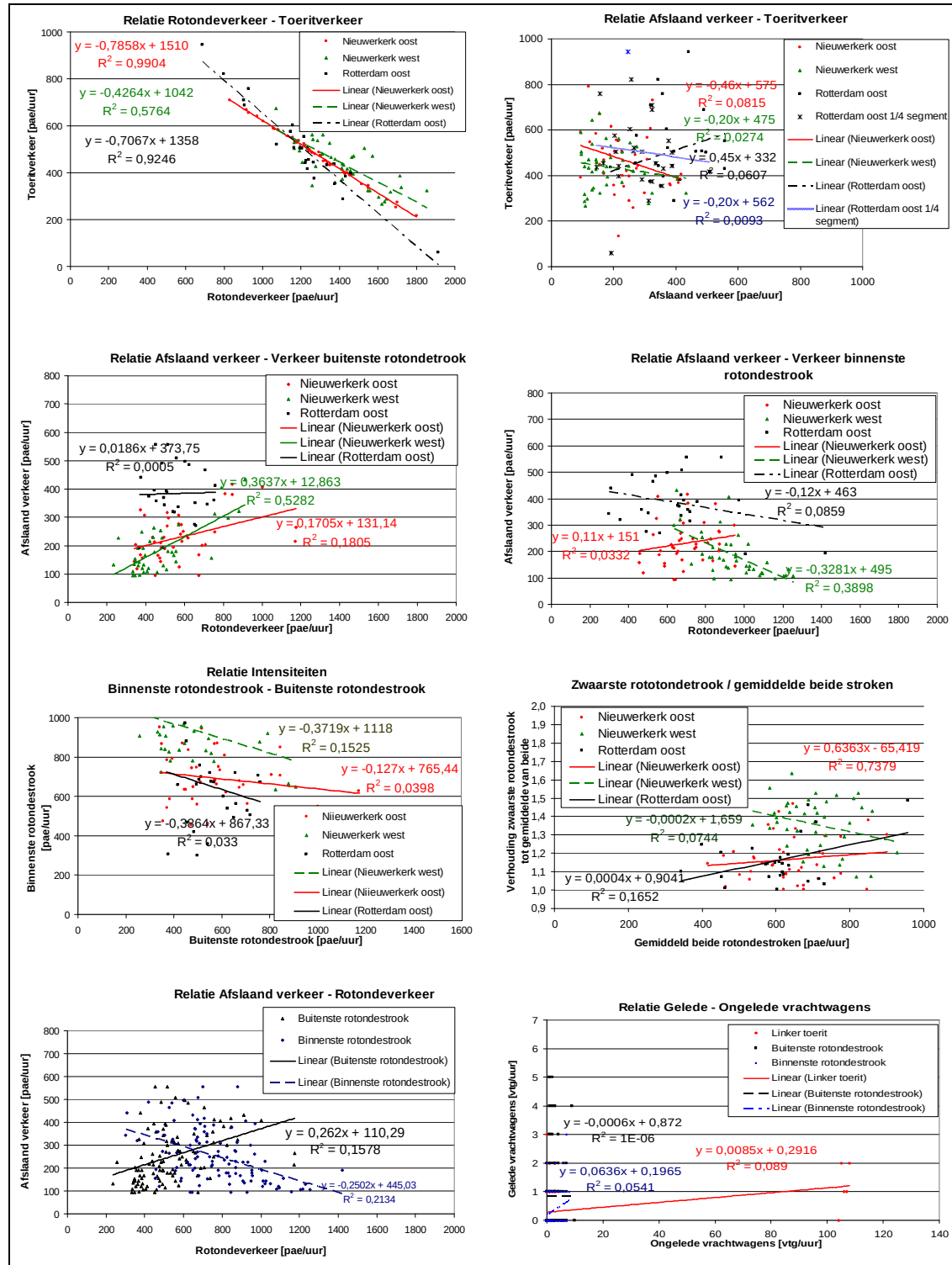


Figuur F.4-7 Grafische weergave vergelijking aangepast model van Tanner^{CKHR} en model Bovy^{KHR} voor de linker toeritstrook van de hoofdtak turbortonde met de parameters uit Tabel F.4.11

F.4.4. Linker toeritstrook zijtak turborotonde

Correlaties tussen variabelen

De correlaties tussen variabelen voor de linker toeritstroken naar het tweestrookssegment van turborotondes zijn grafisch weergegeven in Figuur F.4-8. Het betreft de rotondes Rotterdam (alleen oosttak) en Nieuwerkerk (oost- en westtak).



Figuur F.4-8 Correlatie variabelen linker toeritstrook naar tweestrookssegment turborotonde

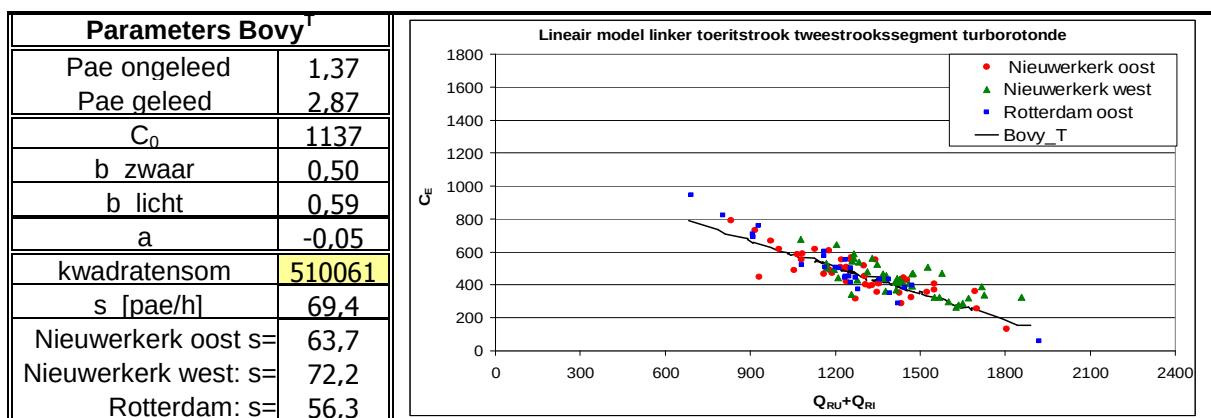
De relatie tussen toeritverkeer en rotondeverkeer is ook hier evident. Tussen afslaand verkeer en toeritverkeer levert de enkelvoudige regressie nergens een significante relatie op. (Ter toelichting: de turborotonde Nieuwerkerk bezit twee bypasses voor rechtsafslaand verkeer vanuit het noorden en zuiden. Daardoor is ook bij de zijtakken bijna al het afslaand verkeer dat een schijnconflict oplevert afkomstig van het voorliggende rotondesegment. Alleen bij de turborotonde Rotterdam is dat anders. Maar ook de enkelvoudige regressie tussen afslaand verkeer vanaf de voorliggende tak en de rotondetak levert daar geen significante relatie op.) Overigens wil dat nog niet zeggen dat dit afslaande verkeer geen invloed op de capaciteit heeft: de invloed van het rotondeverkeer is zo dominant, dat andere invloedsfactoren daarbij in de schaduw staan. De kans is groot, dat bij een enkelvoudige regressie dan geen significante relatie wordt gevonden.

Qua correlaties tussen de verklarende variabelen onderling is vermeldenswaard, dat op de rotonde Nieuwerkerk de correlatie tussen afslaand verkeer en rotondeverkeer op de buitenste rotondestrook vrij hoog is. Dat geldt vooral voor de westtak. Maar in tegenstelling tot de hoofdtakken is dit een positieve correlatie. Wellicht hangt dit samen met het feit dat tijdens het onderzoek nogal wat verkeer een ‘detour’ moest maken, waardoor aan de oostzijde $Q_{RHU} > Q_{RKU}$. Helaas zijn tijdens het onderzoek deze stromen niet onderscheiden. Wel is het verband tussen afslaand verkeer en rotondeverkeer op de binnenste rotondestroken negatief ($R^2 = 0,21$). In het onderzoek naar de wisselwerking tussen Q_{SIH} en Q_{RUK} zal Q_{RI} worden gebruikt als benadering van Q_{RUK} .

Capaciteitsschattingen lineair model zijtak turborotonde

Ook voor de linker toeritstrook naar het tweestrookssegment is gestart met een simultane schatting van de parameters van het lineaire model. Het resultaat is weergegeven in Tabel F.4.12.

Tabel F.4.12 Simultane schatting lineair model linker toeritstrook zijtak turborotonde



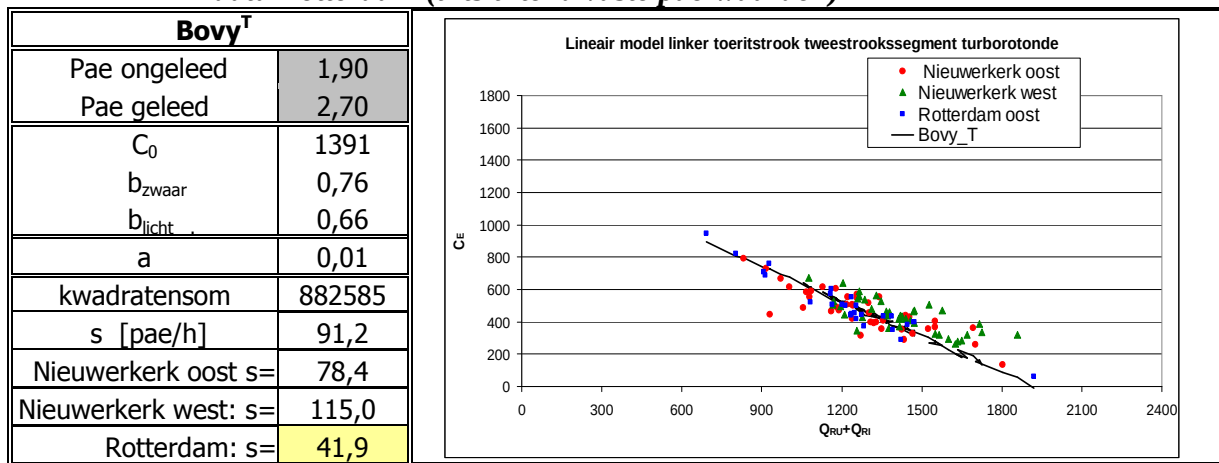
Enkele zaken vallen in dit resultaat op:

- de pae-waarde van ongelede vrachtwagens is laag;
- de C_0 -waarde verhoudt zich eveneens niet tot die van de enkelstrooksrotonde naar rato van de gevonden waarden voor de oprijvolgtijd (wat overeen zou komen met ca. 1500 pae/h);
- de invloed van verkeer op de rotondestroken leidt bij een simultane schatting tot parameterwaarden voor b_{zwaar} en b_{licht} die onbruikbaar zijn in een capaciteitsmodel;

- de invloed van het schijnconflict is tegengesteld aan wat is gevonden bij de enkelstrooksrotonde;
- ook optisch is duidelijk dat de curve bij lage rotonde-intensiteiten niet goed aansluit bij de waarnemingen.

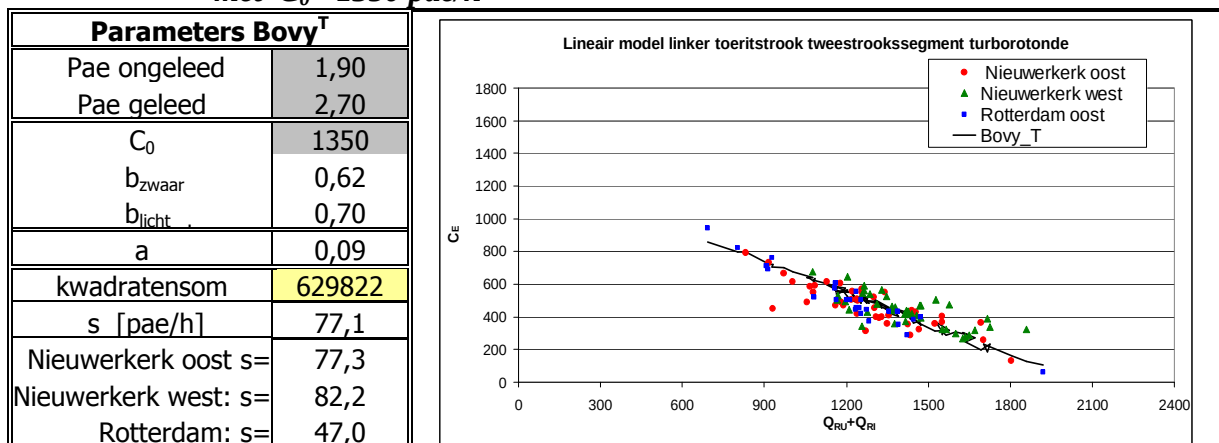
Op de rotonde Rotterdam zijn de rotonde-intensiteiten veelal lager dan op de rotonde Nieuwerkerk. In Tabel F.4.13 is het resultaat weergegeven wanneer een schatting op louter de data van die rotonde wordt gemaakt (waarin alleen de pae-waarden exogeen zijn ingevoerd).

Tabel F.4.13 Simultane schatting lineair model linker toeritstrook zijtak turborotonde op data Rotterdam (uitsluitend vaste pae-waarden)



Het resultaat van Tabel F.4.13 maakt (samen met grafiek van Tabel F.4.12) duidelijk, dat in de parameterschatting op alle data exogeen een hogere waarde van C_0 moet worden ingevoerd. Hiervoor wordt de waarde $C_0=1350$ pae/h gekozen. In de volgende stappen zal ook gebruik worden gemaakt van vaste pae-waarden. Zoals hiervoor is vermeld, is gekozen voor: $pae_{\text{ongeleed}} = 1,9$ en $pae_{\text{geleed}} = 2,7$. Het resultaat is weergegeven in Tabel F.4.14.

Tabel F.4.14 Sequentiële schatting lineair model linker toeritstrook zijtak turborotonde met $C_0 = 1350$ pae/h



Hoewel uiteraard de kwadratensom hoger is dan in Tabel F.4.12, past de curve vooral bij lage rotonde-intensiteiten beter bij de waarnemingen. Bij hogere rotonde-intensiteiten is dat ten

opzichte van Tabel F.4.12 juist andersom. Voor een toerit naar een tweestrooks rotondesegment is dit een bezwaar van een lineair model

Ook zijn de waarden van b_{zwaar} en b_{licht} niet bruikbaar. Immers, als deze coëfficiënten in een capaciteitsmodel worden toegepast, zou dat inhouden dat een minder evenwichtige verdeling van het rotondeverkeer over de rijstroken een gunstig effect zou hebben. Gekozen is om voor b_{zwaar} de waarde te gebruiken die in Tabel F.4.14 voor b_{licht} is gevonden en daarna b_{licht} opnieuw te schatten.

Op de turborotonde Rotterdam is waargenomen, welk deel van het afslaand verkeer afkomstig is van de voorliggende toevoertak en welk deel van het voorliggende rotondesegment. Op de rotonde Nieuwerkerk is op de betreffende rotondestroken bijna geen afslaand verkeer afkomstig van de voorliggende tak, vanwege de aanwezigheid van bypasses.

Niet uitgesloten is, dat bestuurders minder snel kunnen waarnemen dat een voertuig afkomstig van de voorgaande aansluitak gaat afslaan, dan van een voertuig dat van het voorgaande rotondesegment afkomstig is. Om dat te onderzoeken is Model Bovy^T aangepast tot model Bovy^{TKH}, volgens de vergelijking:

$$C_{Ei} = C_{0i} - b_{zwaar} \cdot Q_{zwaar} - b_{licht} \cdot Q_{licht} - a_{Ki} \cdot Q_{S1K} - a_{Hi} \cdot Q_{S1H} \quad (f.18)$$

Hierin is Q_{S1H} het afslaand verkeer dat ten minste een half segment zich op de rotonde bevond en Q_{S1K} het afslaand verkeer dat afkomstig is van de voorliggende tak (en een kwartsegment via de rotonde heeft afgelegd). In Tabel F.4.15 is het resultaat weergegeven.

Tabel F.4.15 *Sequentiële schatting lineair model linker toeritstrook zijtak turborotonde met onderscheiden schijnconflict*

Parameters Bovy ^{TKH} (samengesteld schijnconflict)	
Pae ongeleed	1,90
Pae geleed	2,70
C_0	1350
b_{zwaar}	0,70
b_{licht}	0,61
a_K	0,14
a_H	-0,03
kwadratensom	661533
s [pae/h]	79,0
N'kerk oost s=	80,0
N'kerk west: s=	87,0
Rotterdam: s=	47,0

Lineair model linker toeritstrook tweestrookssegment turborotonde

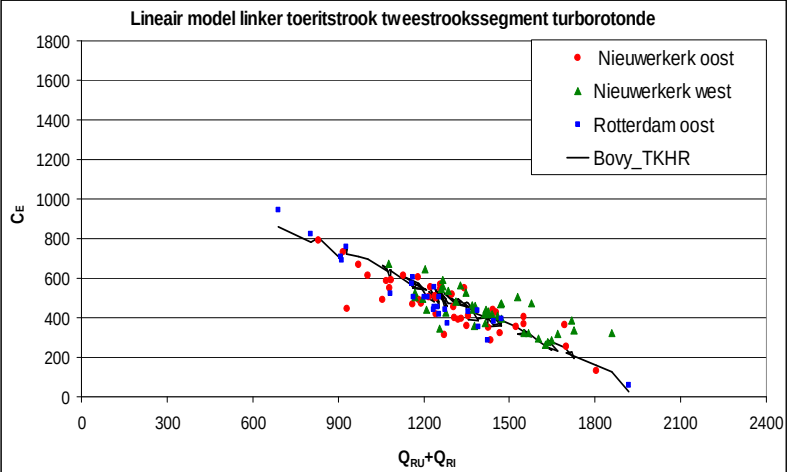
Duidelijk is, dat het afslaand verkeer afkomstig van de voorliggende tak een reducerende invloed op de toeritcapaciteit heeft, maar dat het verkeer afkomstig van het daarvoor liggende segment nauwelijks invloed heeft. Dit laatste stemt overeen met wat is gevonden in Tabel F.4.9.

Ten slotte is onderzocht in hoeverre het opsplitsen van de invloed van het afslaand verkeer vanaf het voorliggende rotondesegment (Q_{SH}) een verbetering van het resultaat oplevert.

Vanwege de interactie tussen de termen $a_{Ki} \cdot Q_{S1K}$ en $a_{HRI} \cdot \frac{Q_{RU(K)} \cdot Q_{S1H}}{Q_{RU(K)} + Q_{S1H}}$ met b_{zwaar} en b_{licht}

zijn alleen de waarden van a_K , a_H en a_{HK} vrij gelaten. Als dan bij b_{zwaar} ,7 voor b_{licht} =0,61 wordt ingevuld, wordt de kleinste standaardafwijking gevonden. Zie Tabel F.4.16.

Tabel F.4.16 Sequentiële schatting model BovyTKHR

Bovy^{TKHR} $C_E = Q_0 - b_{zwaar} \cdot Q_{Rzwaar} - b_{licht} \cdot Q_{Rlicht} - a_K \cdot Q_{S1K} - a_H \cdot Q_{S1H} - a_{HR} \cdot Q_{S1H} \cdot Q_{RU} / (Q_{S1H} + Q_{RU})$			
Pae ongeleed	1,90		
Pae geleed	2,70		
C_0	1350		
b_{zwaar}	0,70		
b_{licht}	0,61		
$a_{K,1}$	0,15		
$a_{H,1}$	0,17		
$a_{HR,1}$	-0,28		
kwadratensom	660101		
s [pae/h]	78,9		
N'kerk oost s=	80,9		
N'kerk west: s=	85,6		
Rotterdam: s=	47,4		

Overigens is het verschil gering. Wel blijkt, dat de verschillen tussen de waarden van de standaardafwijkingen van de onderscheiden rotondetakken kleiner zijn geworden.

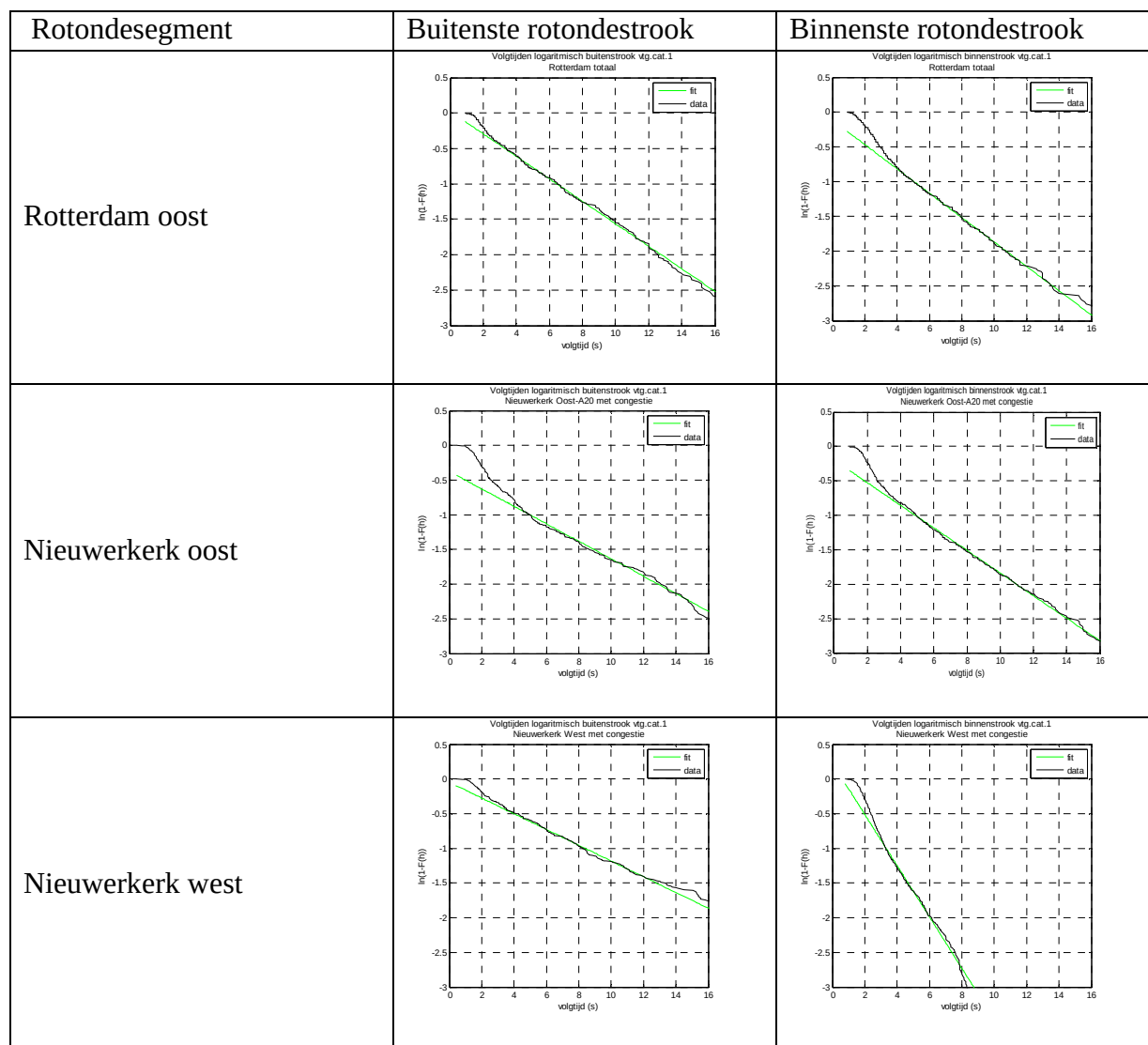
Capaciteitsschattingen model Hagring^{CKHR} zijtak turborotonde

De formule van Hagring komt in aanmerking om als uitgangspunt te dienen voor een exponentieel capaciteitsmodel van een toeritstrook naar een tweestrookssegment van de turborotonde (zijtak), met de modificaties uit paragraaf 5.8.2.

De factoren δ en ψ zijn stapsgewijze in de laatste fase van het kalibratieproces bepaald, om het verschil duidelijk te doen zijn tussen de waarden van het kritisch hiaat vanuit de hiaatwaarnemingen en die uit de capaciteitsmetingen volgen.

In Figuur F.4-9 zijn de volgtijden op de twee rotondestroken negatief exponentieel uitgezet. Op beide rotondestroken is de afwijking van een rechte boven de waarde $h = 4$ s niet groot, zodat het verantwoord is om uit te gaan van een waarde $\rho \leq 1$. Verder is bekend dat er zich in de nabijheid van de zijtakken van genoemde rotondes geen verkeerslichten bevinden, zodat het voor de hand ligt een waarde $\rho = 1$ te gebruiken. Wel moet worden geconstateerd, dat de waarde $h = 4$ s meer dan 2 seconde boven de waarde $t_M = 1,7$ s/pae ligt, zodat niet uitgesloten is, dat hiaten met volgtijden tussen de 1,7 en 4 seconde oververtegenwoordigd zijn.

Evenals bij de andere rotondetakken worden als eerste stap van het schattingsproces de parameters simultaan geschat voor de modellen Fisk^{CS} en Fisk^{CKH} ($\rho=1$, $\delta=1$ $\psi=1$ en $\mu=t_M$). De resultaten zijn weergegeven in Tabel F.4.17. De manier waarop met het schijnconflict rekening wordt gehouden is niet zonder invloed op de uitkomsten. Maar opvallend is, dat in de tweede kolom zowel d_K als d_H negatief is. Omdat het verschil tussen de waarden van d_H en



Figuur F.4-9 Negatief uitgezette logaritmische frequentieverdeling van de volgtijden op de rotondestroken

d_K inhoudelijk uitsluitend bepaald wordt door de metingen op turborotonde Rotterdam, is ook een simultane schatting uitgevoerd waarin de fouten alleen ten opzichte van die metingen zijn geminimaliseerd. Dat blijkt wel in een positieve waarde voor d_K te resulteren, wat inhoudt dat dit deel van het afslaand verkeer een negatieve invloed heeft op de toeritcapaciteit, terwijl de waarde van d_H negatief is, d.w.z. dat die een positief effect heeft op de toeritcapaciteit. In alle gevallen wijken de waarden van het kritisch hiaat zeer sterk naar boven af van de resultaten verkregen uit de hiaatmetingen. Afhankelijk van de doelfunctie (residuen t.o.v. alle waarnemingen of alleen t.o.v. de waarnemingen van Rotterdam geminimaliseerd) variëren de uitkomsten. Ook wisselen de pae-waarden sterk. Daarom is nog een volgende simultane schatting voor model Fisk^{CS} en Fisk^{CKH} uitgevoerd, waarin vaste pae-waarden zijn gehanteerd. Zie Tabel F.4.18.

Tabel F.4.17 Simultane schatting model $Fisk^{CS}$ en $Fisk^{CKH}$ met twee verschillende doelfuncties

Hagring^{CKH} (samengesteld schijnconflict)				
Pae ongeleed	1,47	1,51	2,36	1,92
Pae geleed	2,75	2,23	2,38	2,14
t_{CU} , 2 hiaatmeting	3,7	3,7	3,7	3,7
t_{F2} hiaatmeting	2,8	2,8	2,8	2,8
t_M	1,59	1,29	2,24	2,27
η	= t_M	= t_M	= t_M	= t_M
$t_{CU,1}$ effectief	5,12	5,49	4,12	4,16
$t_{CI,1}$ effectief	3,92	4,25	4,25	4,07
t_{F1} effectief	2,19	2,10	1,83	1,92
d_K	-0,12	-0,05	0,03	0,24
d_H	= d_K	-0,30	= d_K	-0,30
ρ	1	1	1	1
δ	1	1	1	1
Kwadratensom (tot)	465455	453040	949643	704127
s [pae/h]	66,3	65,4	94,7	81,5
N' kerk oost: s=	62,0	62,5	73,9	82,2
N' kerk west: s=	68,0	67,5	127,5	92,6
Rotterdam: s=	63,5	59,2	44,7	40,2

Tabel F.4.18 Simultane schatting model $Fisk^{CS}$ en $Fisk^{CKH}$ met twee verschillende doelfuncties

Hagring^{CKH} (samengesteld schijnconflict)				
Pae ongeleed	1,90	1,90	1,90	1,90
Pae geleed	2,70	2,70	2,70	2,70
t_{CU} , 2 hiaatmeting	3,7	3,7	3,7	3,7
t_{F2} hiaatmeting	2,8	2,8	2,8	2,8
η	= t_M	= t_M	= t_M	= t_M
t_M	1,33	1,08	2,23	2,26
$t_{CU,1}$ effectief	5,14	5,39	4,29	4,00
$t_{CI,1}$ effectief	4,04	4,27	4,20	3,99
t_{F1} effectief	2,07	2,04	1,91	1,98
d_K	-0,09	-0,07	-0,03	0,20
d_H	= d_K	-0,28	= d_K	-0,28
ρ	1	1	1	1
δ	1	1	1	1
kwadratensom(tot)	477004	464991	775282	697633
s [pae/h]	67,1	66,2	85,5	81,1
N' kerk oost: s=	62,8	62,8	69,7	83,0
N' kerk west: s=	68,3	68,7	111,7	90,5
Rotterdam: s=	65,0	60,4	45,7	41,0

In de marge kan worden opgemerkt dat in de derde kolom (schatting op basis van de data van de rotonde Rotterdam) van Tabel F.4.18 de uitkomsten voor de totale kwadratensom veel

lager zijn dan in Tabel F.4.17. Maar ook de totale som van de kwadraten van de vierde kolom is kleiner geworden: de gekozen algemene pae-waarden sluiten beter aan bij de waarnemingen van de zijtakken van de drie rotondes samen, dan die gevonden worden in een schatting van dit model uitsluitend op de waarnemingen van de rotonde Rotterdam.

Verder blijkt ook uit Tabel F.4.18, dat de waarden van de minimum volgtijd t_M nogal sterk variëren (tussen 1,08 en 2,26 s/pae), de waarden van de oprijvolgtijd t_F in alle uitkomsten lager zijn dan de 2,20 à 2,28 s/pae uit de hiaatmetingen en de waarden van de parameters voor de invloed van het schijnconflict sterk variëren.

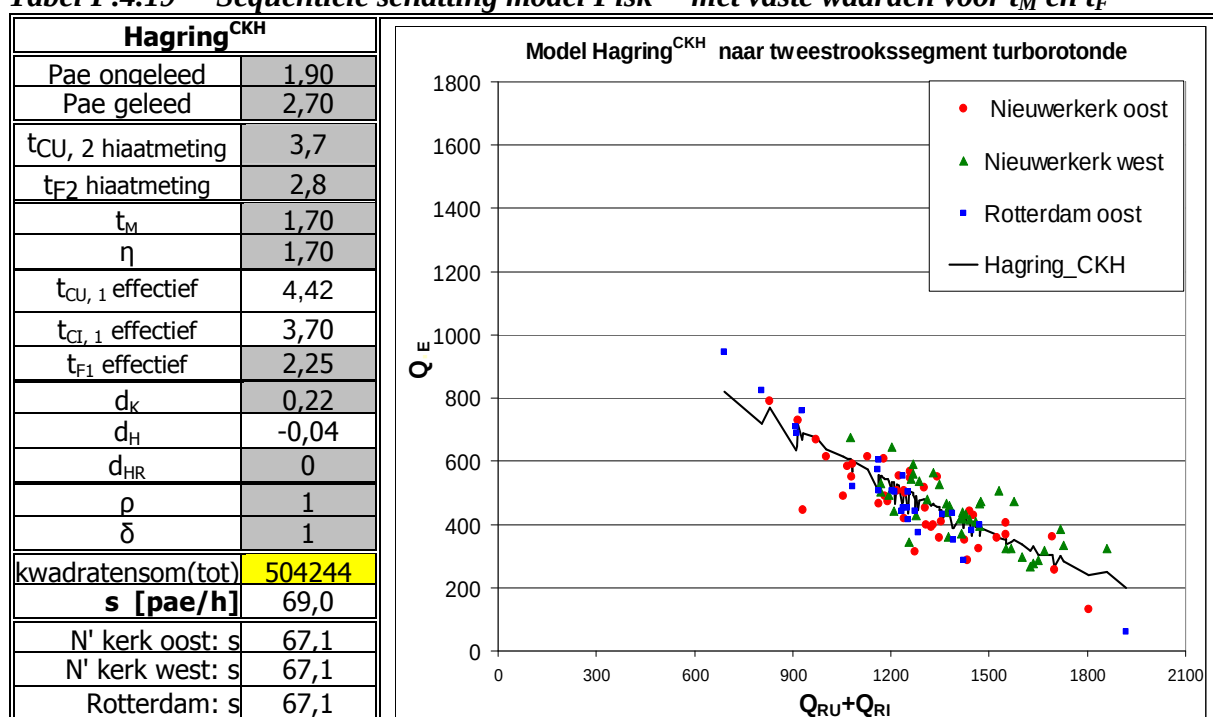
Ten slotte is een belangrijkste constatering, dat de waarden van het kritisch hiaat overal aanzienlijk hoger zijn dan die op basis van hiaatmetingen zijn gevonden voor de bruto waarden: $t_{CU,1} = 2,79$ à $3,42$ s/pae en $t_{CI,1} = 3,15$ à $3,24$ s/pae.

De conclusie uit Tabel F.4.18 is, dat sequentiële schattingen nodig zijn om een onderzoek in te stellen naar de overdraagbaarheid van parameterwaarden naar een model dat op stroomwaarnemingen wordt gekalibreerd.

Als eerstvolgende stap is het model Fisk^{KH} geschat, met de exogene waarde $t_M = 1,7$ s/pae en $t_F = 2,25$ s/pae, terwijl voor d_K de waarde $d_K = 0,22$ is gekozen.

Het resultaat is weergegeven in Tabel F.4.19.

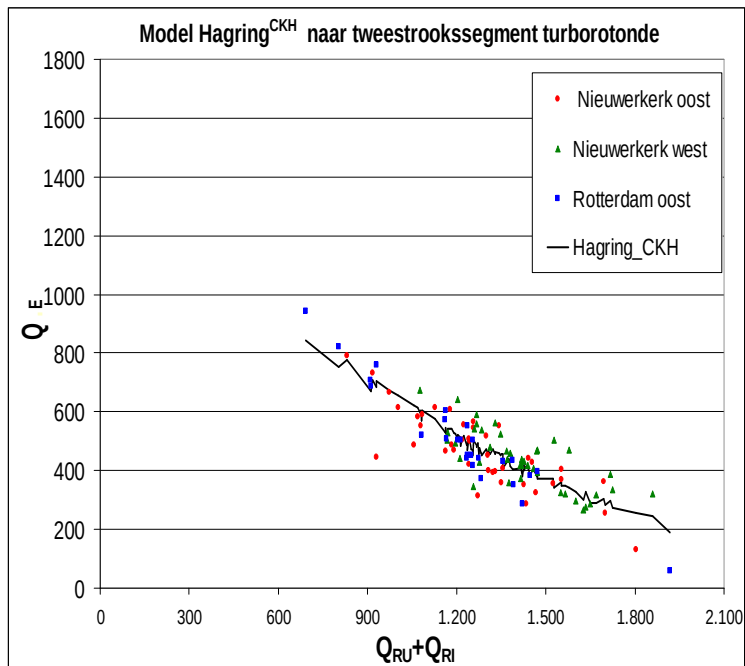
Tabel F.4.19 *Sequentiële schatting model Fisk^{KH} met vaste waarden voor t_M en t_F*



Ondanks het feit, dat in voorgaande tabellen steeds $t_{CU,1} > t_{CI,1}$ is, geldt voor het merendeel van de kritische hiaten die op grond van de hiaatmetingen zijn bepaald het omgekeerde, zij het minder uitgesproken. Op grond daarvan is besloten één waarde voor het kritisch hiaat in de buitenste en binnenste rotondestrook te gebruiken: voor het kritisch hiaat uit de hiaatmetingen $t_{hiaatCU,1} = t_{hiaatCI,1} = 3,15$ s/pae en voor de te schatten effectieve waarden $t_{effectiefCU,1} = t_{effectiefCI,1}$. In Tabel F.4.20 is zowel de algemene correctiefactor δ als de vermenigvuldigingsfactor ψ voor de kritische hiaten gebruikt.

Tabel F.4.20 Model Fisk^{CKH}; onderzoek naar waarde van ψ met δ

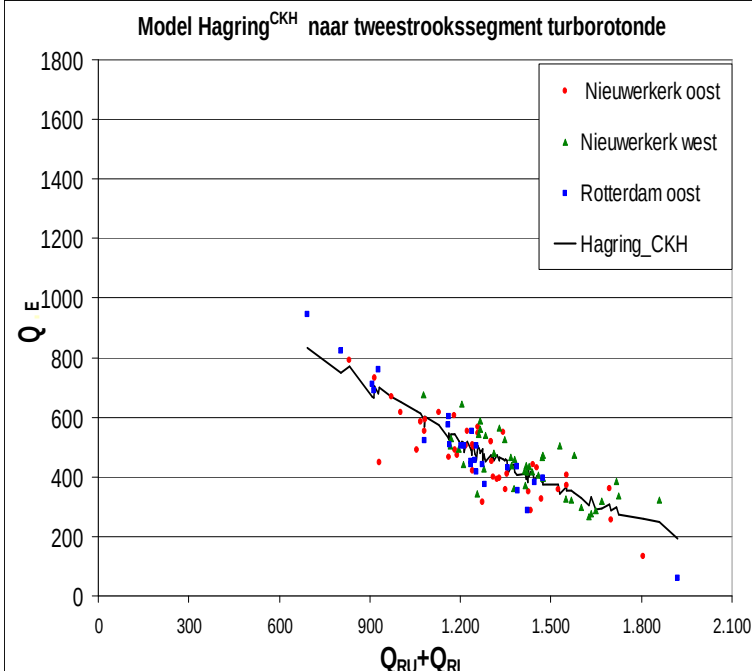
Hagring^{CKH}	
Pae ongeleed	1,90
Pae geleed	2,70
$t_{CU, 2}$ hiaatmeting	3,7
t_{F2} hiaatmeting	2,8
$t_{CU,1} = t_{CI,1}$ hiaatmeting	3,15
t_{F1} hiaatmeting	2,25
t_M	1,70
η	1,70
$t_{CU,1}$ effectief	3,96
d_K	0,22
d_H	0,04
ρ	1,00
ψ	1,28
δ	1,03
kwadratensom(tot)	522326
s [pae/h]	70,2
N'kerk oost: s	69,7
N'kerk west: s	70,7
Rotterdam: s	60,9



Omdat de algemene correctiefactor δ in Tabel F.4.20 een waarde >1 heeft, is in Tabel F.4.21 de waarde $\delta=1$ gesteld: alleen de vermenigvuldigingsfactor ψ is gebruikt.

Tabel F.4.21 Sequentiële schatting model Fisk^{CKH} met uitsluitend de hiaatcorrectiefactor ψ

Hagring^{CKH}	
Pae ongeleed	1,90
Pae geleed	2,70
$t_{CU, 2}$ hiaatmeting	3,7
t_{F2} hiaatmeting	2,8
t_M	1,70
$t_{CU,1} = t_{CI,1}$ hiaatmeting	3,15
t_{F1} hiaatmeting	2,25
d_K	0,22
d_H	0,04
ρ	1,00
ψ	1,26
δ	1,00
kwadratensom(tot)	522326
s [pae/h]	70,2
N'kerk oost: s	69,7
N'kerk west: s	70,7
Rotterdam: s	60,9

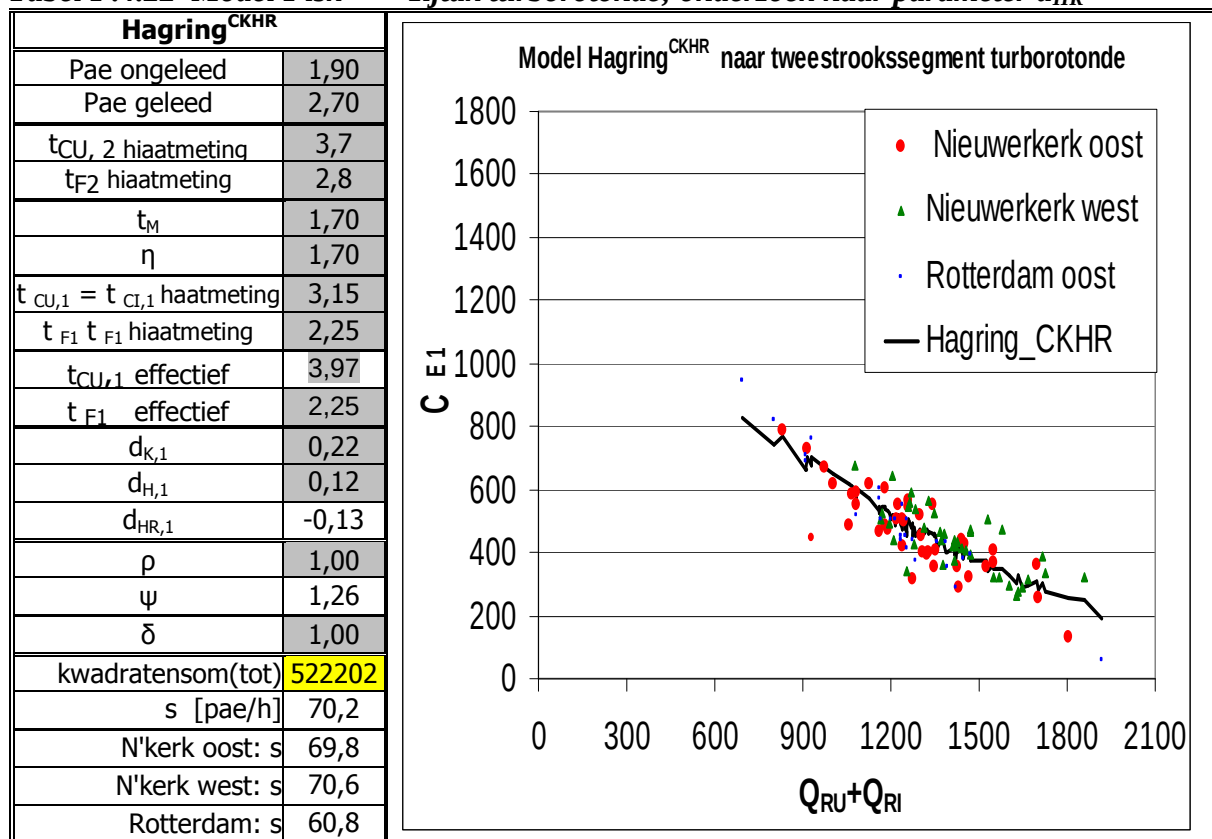


Uit vergelijking van beide tabellen kan de conclusie worden getrokken, dat:

- op de linker toerit naar een tweestrookssegment van de turborotonde het belangrijkste verschil tussen de parameterwaarden uit hiaatmetingen en capaciteitsmetingen betrekking heeft op de waarden van de kritische hiaten;
- de algemene correctiefactor δ achterwege kan blijven.

Duidelijk is, dat op de zijtak de waarden voor de kritische hiaten $t_{CU,1} = t_{CI,1} = 3,15$ s/pae vanuit de hiaatmetingen met 26% verhoogd moeten worden voor toepassing in een capaciteitsmodel voor een toeritstrook naar een tweestrooksrotondesegment.

Tabel F.4.22 Model Fisk^{CKHR} zijtak turborotonde; onderzoek naar parameter d_{HR}

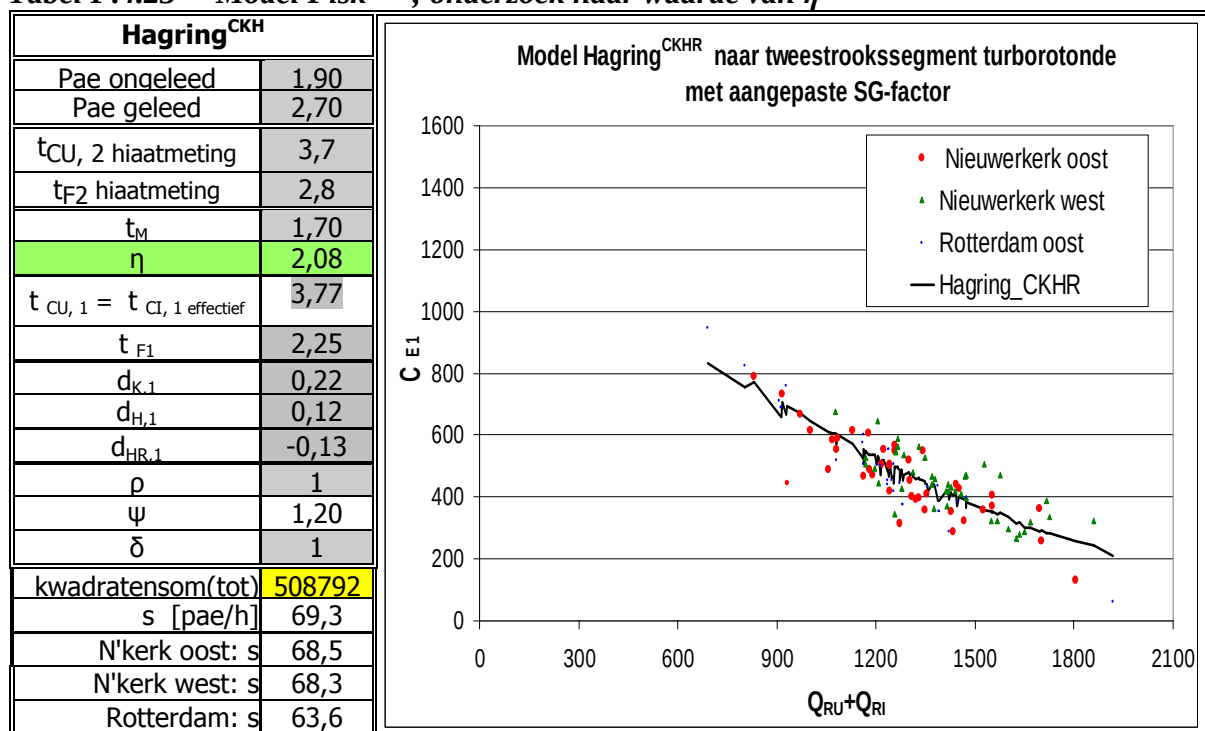


In Tabel F.4.22 is onderzocht of toevoeging van parameter d_{HR} uit vergelijking (f.17) verbetering oplevert voor het beschrijven van de invloed van het schijnconflict. De resultaten blijken erg gevoelig te zijn voor de waarden van de andere parameters. De vrij complexe modelstructuur van het exponentiële capaciteitsmodel is daar wellicht debet aan. De laagste kwadratensom (522.174) wordt verkregen met de parameterset $d_K = 0,22$, $d_H = 0,18$ en $d_{HR} = -0,22$. Voorzichtigheidshalve is gekozen voor de set $d_K = 0,22$, $d_H = 0,12$ en $d_{HR} = -0,15$ met een kwadratensom die een fractie hoger is (522.202) en op één decimaal nauwkeurig dezelfde waarde voor de standaardafwijking oplevert (70,2 pae/h). Vergeleken met Tabel F.4.21 laat de uitkomst van Tabel F.4.22 een geringe verbetering zien na toevoeging van de parameter d_{HR} aan de set van parameters voor het schijnconflict.

In Tabel F.4.23 is het resultaat weergegeven van een schatting waarin de strookgebruikfactor SG is aangepast volgens vergelijking (4.36). De verhouding $v = \eta/t_M$ (synchronisatieconstante) geeft aan of de hiaten op de beide rotondestroken in het onderzoek in ongunstige zin ($v > 1$)

dan wel in gunstige zin ($v < 1$) gesynchroniseerd waren. Het resultaat is weergegeven in Tabel F.4.23.

Tabel F.4.23 Model Fisk^{CKH}; onderzoek naar waarde van η



Daaruit is een viertal conclusies te trekken:

- de waarde $\eta=2,08$ s/pae in de aangepaste strookgebruikfactor SG is een indicatie dat in de totale waarnemingsset sprake is van een nadelige hiaatsynchronisatie;
- op de rotonde Nieuwerkerk levert deze toevoeging een iets beter schattingsresultaat,
- maar op de rotonde Rotterdam verslechtert het resultaat, terwijl ook het resultaat volstrekt tegengesteld is wanneer de kwadratensom van de afwijkingen voor deze rotondes als doelfunctie wordt gehanteerd ($\eta=1,30$ s/pae);
- de uitbreiding van de strookgebruikfactor SG leidt tot een lagere waarde van het kritisch hiaat deels als compensatie van de waarde van de synchronisatieconstante $v > 1$.

In verband met deze tegengestelde tendensen is een onderzoek ingesteld naar de grootte van deze effecten. Dit is gedaan voor zowel twee uiterste verdelingen van het verkeer over de rotondestroken: al het verkeer op één strook en het verkeer (op uurbasis) gelijk over de rotondestroken verdeeld.

Daaruit komen ook twee tegengestelde effecten naar voren:

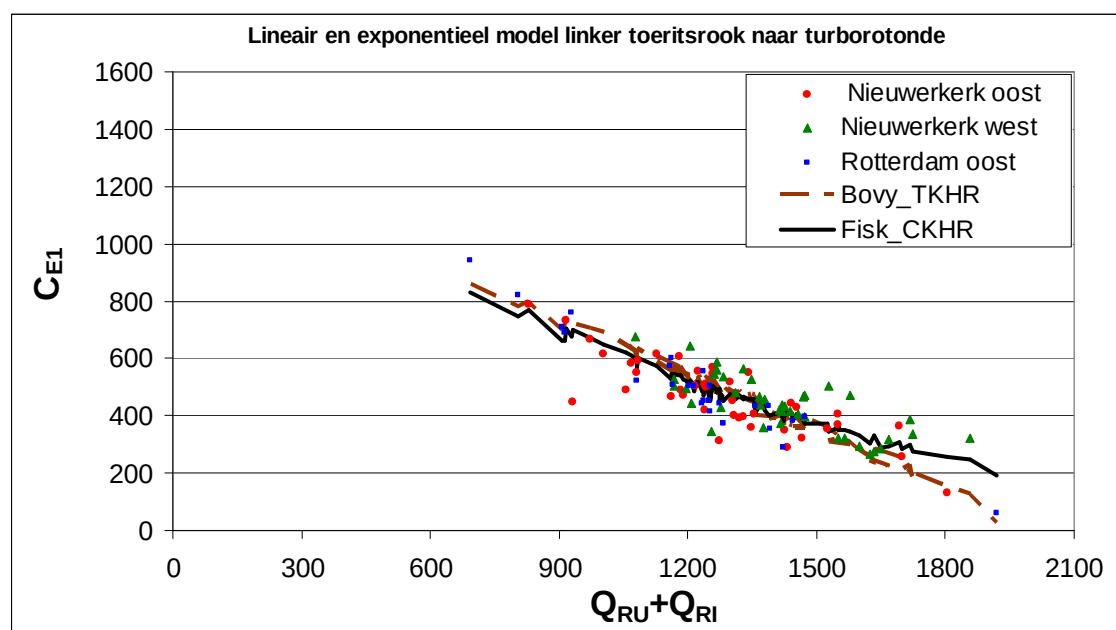
- bij al het verkeer op één rotondestrook leidt de standaardbenadering tot een onderschatting van de toeritcapaciteit; het maximale verschil van 35 pae/h treedt op bij een rotonde-intensiteit van 1000 pae/h;
- bij een fifty-fifty verdeling van het verkeer over de rotondestroken leidt de standaardbenadering daarentegen tot een overschatting van de toeritcapaciteit; het grootste verschil treedt op bij een rotonde-intensiteit tussen de 1900 en 2700 pae/h, waarbij de overschatting van de toeritcapaciteit 15 pae/h bedraagt.

De oorzaak van het eerstgenoemde is de hogere waarde van het kritisch hiaat in de standaardbenadering (Tabel F.4.22: $t_c = 3,97$ s/pae) ten opzichte van de aangepaste benadering (Tabel F.4.23: $t_c = 3,77$ s/pae).

Tabel F.4.24 en Figuur F.4-10 tonen samen het verschil in schattingsresultaat tussen een lineair en een exponentieel model voor de linker toeritstrook naar een tweestrooks rotondesegment. Duidelijk is, dat de hogere residuen van het lineaire model samenhangen met grotere afwijkingen bij de hoge en/of lage rotonde-intensiteiten.

Tabel F.4.24 *Vergelijking residuen model Bovy^{TKHR} en Tanner^{CKHR} linker toeritstrook zijtak turborotonde*

	Lineair model Bovy ^{TKHR} uit Tabel F.4.16	Exponentieel model Tanner ^{CKHR} uit Tabel F.4.22
Kwadratensom	660.101	522202
s [pae/h]	78,9	70,2
N'kerk oost: s=	80,9	69,8
N'kerk west: s=	85,6	70,6
Rotterdam: s=	47,4	60,8



Figuur F.4-10 *Vergelijking twee capaciteitsmodellen van de linker toeritstrook van de zijtak van de turborotonde*

F.4.5. Effect van verdeling verkeer over twee rotondestroken op de capaciteit van de linker toeritstrook zijtak

Relatie tussen strookverdeling in vijf-minutenwaarnemingen en uurperioden

De relatie tussen de strookverdeling in de vijf-minutenwaarnemingen en uurperioden kan goed benaderd worden met:

Als $Q_{RU} > Q_{RI}$ (op uurbasis),

$$Q_{RU\ 5\min} = Q_{RU} + 0,10 \cdot Q_{RI}^2 / (Q_{RU} + Q_{RI}) \text{ en } Q_{RI\ 5\min} = Q_{RI} - 0,10 \cdot Q_{RI}^2 / (Q_{RU} + Q_{RI}) \quad (f.19)$$

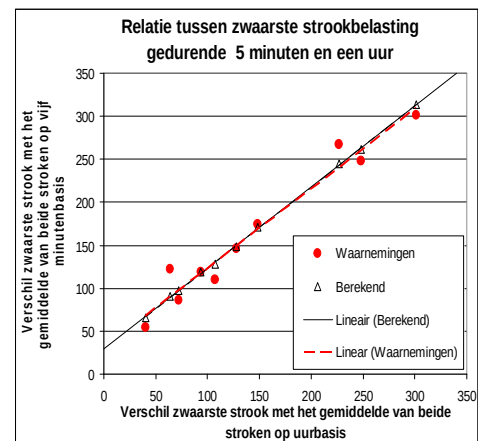
anders

$$Q_{RU\ 5\min} = Q_{RU} - 0,10 \cdot Q_{RU}^2 / (Q_{RU} + Q_{RI}) \text{ en } Q_{RI\ 5\min} = Q_{RI} + 0,10 \cdot Q_{RU}^2 / (Q_{RU} + Q_{RI})$$

De aanname in deze formule is, dat het relatieve verschil tussen de vijf-minutenverdeling en de uurverdeling afneemt naarmate de verdeling over beide rotondestroken schever wordt. Het stelsel vergelijkingen (f.19) is geschat met een spreiding $s = 17,6$ pae/h.

$$\text{De waarden } q_{RU} = Q_{RU\ 5\min} / 3600 \text{ en } q_{RI} = Q_{RI\ 5\min} / 3600 \text{ [pae/s]} \quad (f.20)$$

moeten in de prognosefase worden ingevuld in capaciteitsformule. Figuur F.4-11 laat zien dat dit een werkbare benadering is.



Figuur F.4-11 De zwaarst belaste rotondestrook ten opzichte van het gemiddelde gedurende vijf minuten vergeleken met die in een uur.

Verdeling rotondeverkeer over twee stroken

Tabel F.4.25 Gemeten gemiddelde intensiteiten in spitsperioden

	Q_{RU} [pae/h]	Std [pae/h]	Q_{RI} [pae/h]	Std [pae/h]	$Q_{RI}/(Q_{RU}+Q_{RI})$	C_{E1} [pae/h]	Std [pae/h]	C_{E2} [pae/h]	Std [pae/h]
N'kerk oost	586	200,8	692	128,1	0,548	471	130,1	599	115,6
N'kerk west	477	164,8	943	156,7	0,667	438	99,6	102	43,1
R'dam oost	562	113,9	655	237,8	0,526	507	178,6	niet gemeten	

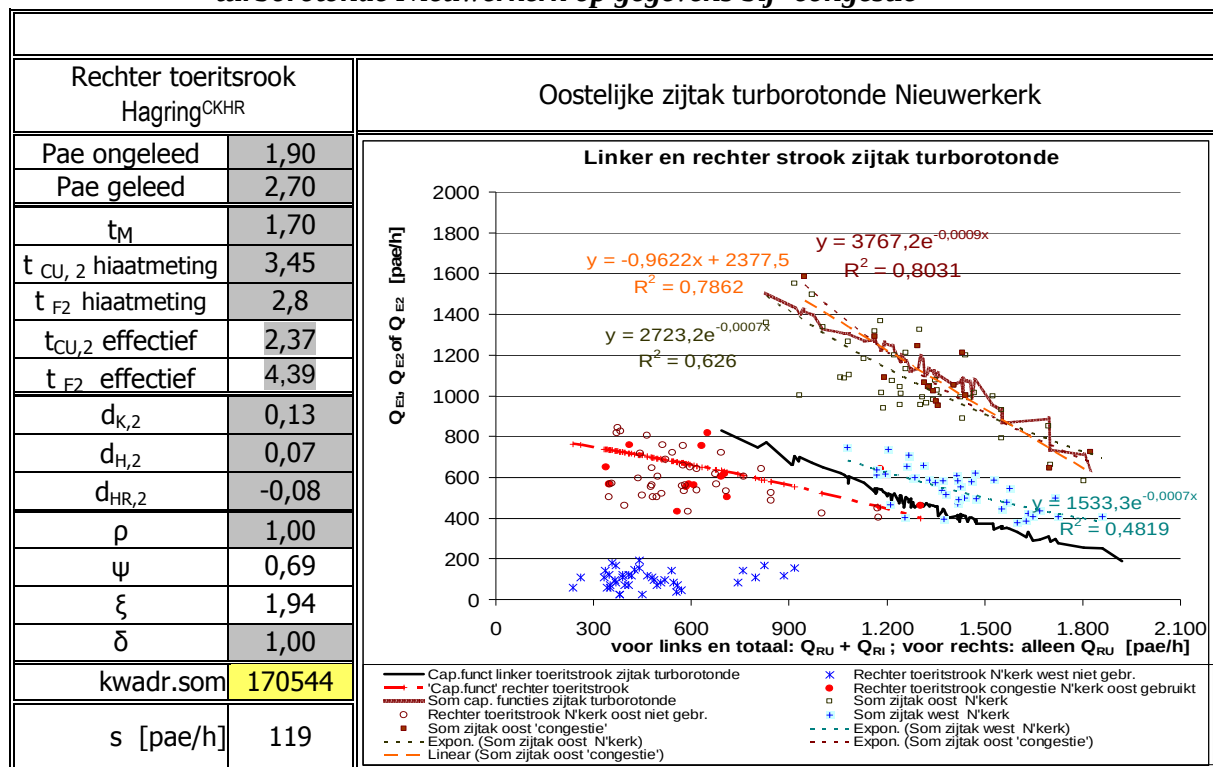
F.4.6. Capaciteit rechter toeritstroken turborotonde

Rechter toeritstrook zijtak turborotonde

Op de onderzochte turborotondes was zelden de rechter toeritstrook tot zijn capaciteit belast. Alleen op de rechter strook van de oostelijke aansluitak van de rotonde Nieuwerkerk zijn bij de verwerking veertien vijf-minutenperioden aangemerkt als congestieperioden. Gestart wordt met een simultane schatting van $t_{CU,2}$ en t_{F2} , met uitsluitend de gegevens bij wachtrijen van ca. vijf minuten. Zie Tabel F.4.26. Hierin zijn de parameters $d_{K,2}$, $d_{H,2}$ en $d_{HR,2}$ voor de invloed

van het afslaand verkeer ten opzichte van die van de linker toeritstrook met een factor 0,6 vermenigvuldigd, omdat de afstand tot de afslaande stromen groter is (Bovy, 1991 en Ern , 1995).

Tabel F.4.26 *Simultane schatting parameters rechter rijstrook oostelijke zijtak turborotonde Nieuwerkerk op gegevens bij ‘congestie’*

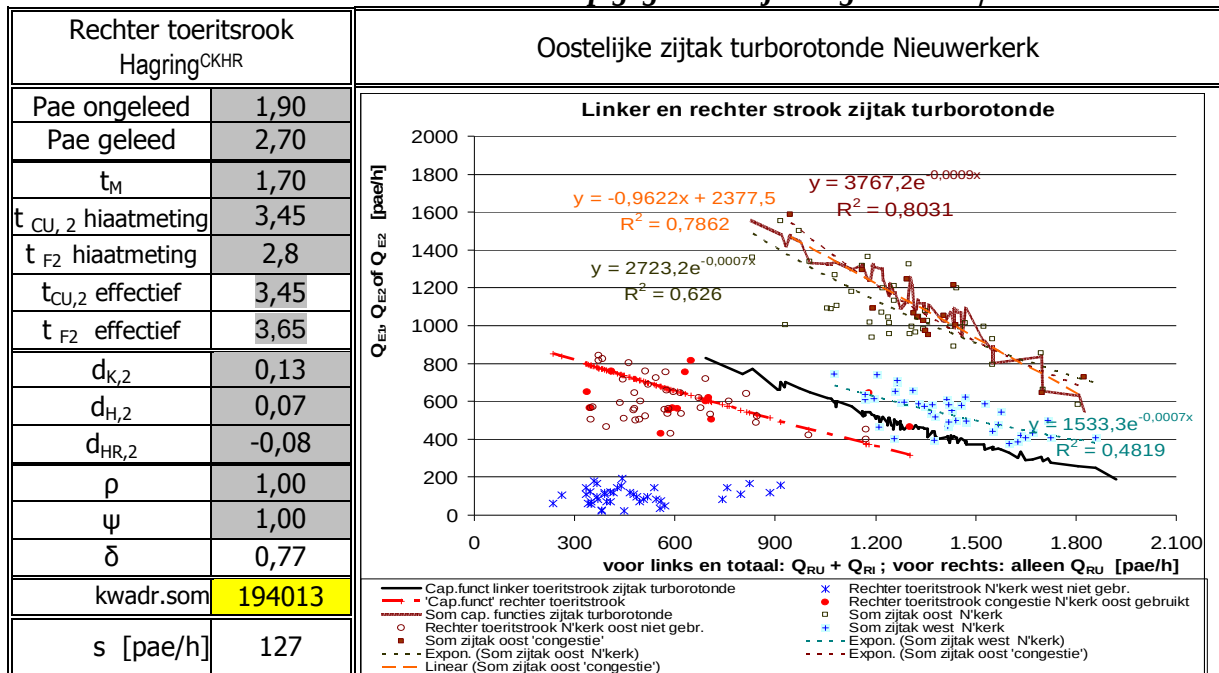


Het resultaat in Tabel F.4.26 is: $t_{CU,2} = 2,37$ (met $\psi = 0,69$) en $t_{F2} = 4,39$ s/pae. De combinatie van waarden van $t_{CU,2} = 2,37 < t_{F2} = 4,39$ wijst erop dat de capaciteitsmeting op stroomniveau een te lage capaciteit laat zien bij lage rotonde-intensiteiten.

Tabel F.4.27 laat het resultaat zien als $\psi = 1$ wordt gehanteerd. Maar ook dan resulteert nog een oprijvolgtijd $t_{F2} = 3,65$ s/pae $> t_{CU,2} = 3,45$ s/pae. Dit zijn geen realistische waarden. Bij het opnieuw bekijken van de opnamen blijken inderdaad relatief veel korte onderbrekingen in de aanvoer voor te komen in perioden waarin verder wel congestie optrad⁴⁹. Omdat niet de tijdstippen van de ‘congestieperioden’ bij de verwerking zijn overgenomen, zou de gehele verwerkingsprocedure over moeten om de oorspronkelijke ‘congestieperioden’ op te splitsen tot meerdere perioden van kortere duur, waarin de auto’s wel geheel aansluiten. Hiervan is afgezien, mede omdat dan vertekening kan optreden door geheel verschillende waarnemingsperioden. In de grafiek bij Tabel F.4.27 is opvallend, dat bij minder dan 630 pae/h op de buitenste rotondestrook er op de rechter toeritstrook hogere intensiteiten voorkomen zonder (vastgestelde) congestie dan tijdens de ‘congestieperioden’. Daarom is ervoor gekozen om uit de dataset de waarden te verwijderen die in vergelijking met de curve van de grafiek bij Tabel F.4.27 er laag uitspringen. Het resultaat is weergegeven in Tabel F.4.28 met grafiek.

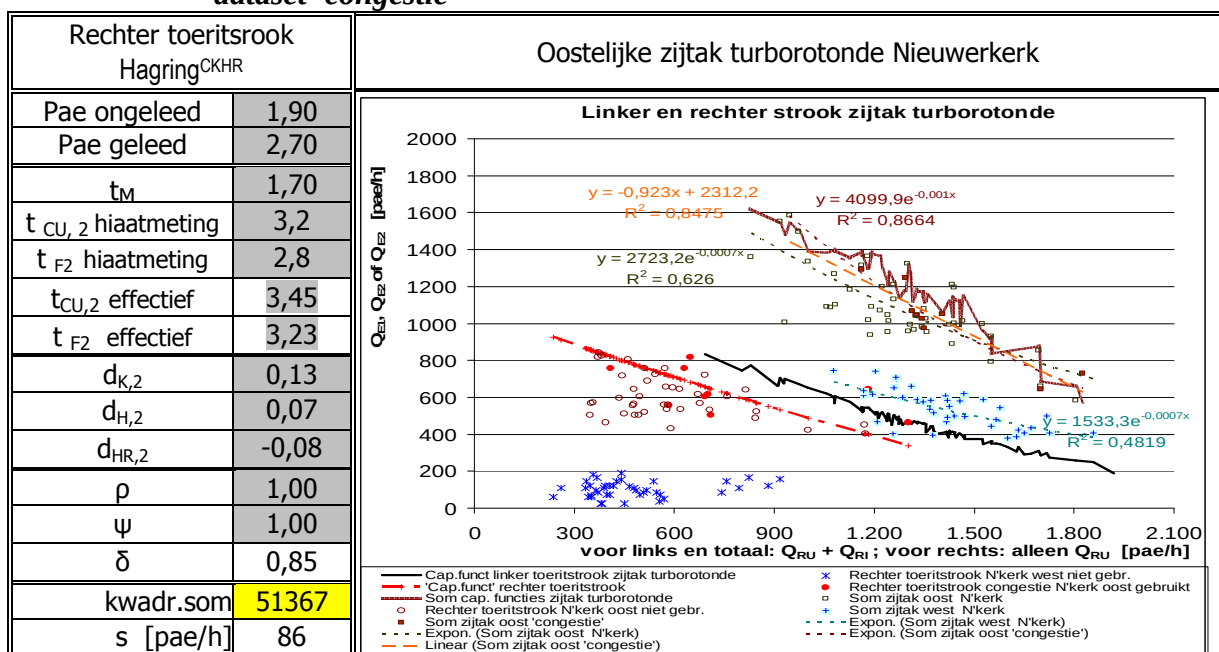
⁴⁹ Zie voetnoot bij Tabel F.3.6.

Tabel F.4.27 1^e sequentiële schatting parameter t_{F2} rechter rijstrook oostelijke zijtak
turborotonde Nieuwerkerk op gegevens bij 'congestie' en $\psi=1$



In het resultaat van Tabel F.4.28 is $t_{F2} \text{ effectief} = 3,36 \text{ s/pae} < t_{CU,2} \text{ effectief} = 3,45 \text{ s/pae}$. Deze functie behoeft dan ook niet verworpen te worden. Maar evenzeer is het resultaat van Tabel F.4.29 bruikbaar. Daarin is uitgaande van $\delta = 1$, en een (hogere) waarde voor het effectieve kritisch hiaat $t_{Ceff} = 3,6 \text{ s/pae}$ de waarde $t_{Feff} = 3,38 \text{ s/pae/h}$ gevonden bij een vergelijkbare waarde van de kwadraten som van de afwijkingen.

Tabel F.4.28 2^e sequentiële schatting parameter rechter rijstrook oostelijke zijtak
turborotonde Nieuwerkerk na verwijdering onverklaarbare lage waarden in
dataset 'congestie'



Tabel F.4.29 3^e sequentiële schatting parameter rechter rijstrook oostelijke zijtak
turborotonde Nieuwerkerk bij $\delta = 1$, $t_{Fstart} = 3$ s/pae en $t_{Ceff} = 3,6$ s/pae

Rechter toeritsrook Hagring _{CKHR}		Oostelijke zijtak turborotonde Nieuwerkerk	
Pae ongeleed	1,90		
Pae geleed	2,70		
t_M	1,70		
$t_{CU,2}$ hiaatmeting	3,45		
t_{F2} hiaatmeting	2,80		
$t_{CU,2}$ effectief	3,60		
t_{F2} effectief	3,38		
$d_{K,2}$	0,13		
$d_{H,2}$	0,07		
$d_{HR,2}$	-0,08		
ρ_2	1,00		
ψ_2	1,04		
ζ_2	1,21		
δ_2	1,00		
kwadr.som	50153		
s [pae/h]	85		

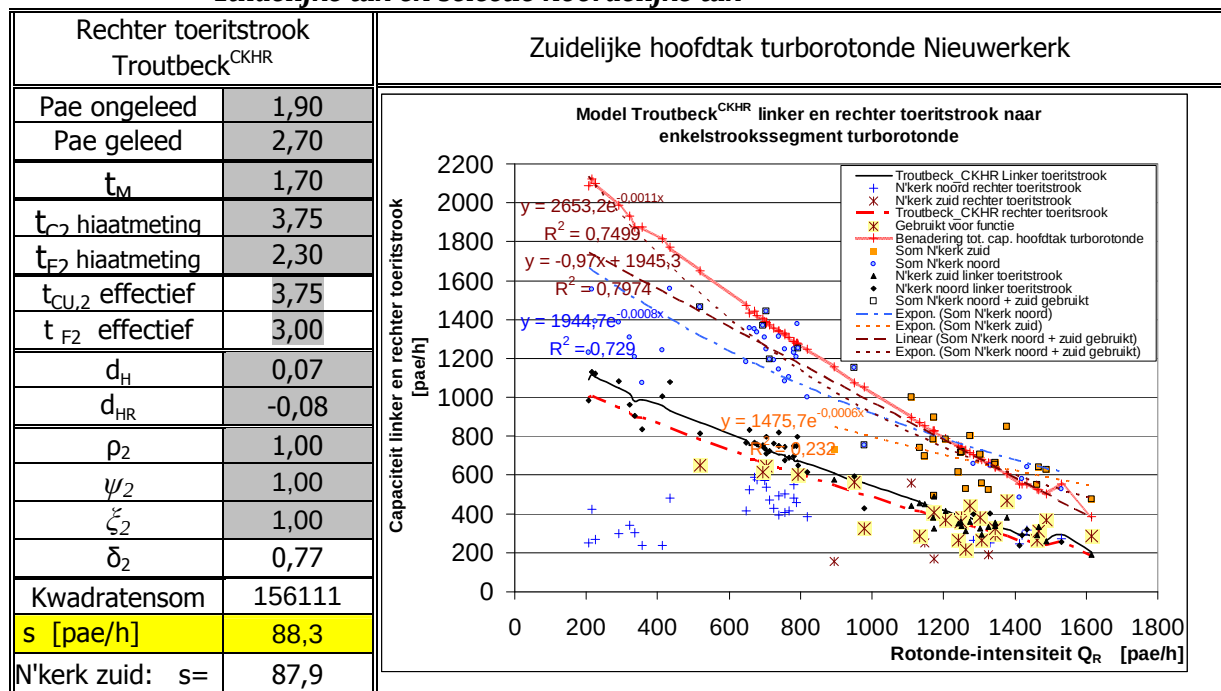
N.B. De sterke fluctuaties van de som van beide toeritcapaciteitsfuncties zijn het gevolg van toevallige fluctuaties in de verhouding tussen de intensiteiten op de binnenste en buitenste rotondestrook in de opeenvolgende waarden van de totale rotonde-intensiteit.

Bij de hogere rotonde-intensiteiten zijn op de rechter toeritstrook intensiteiten waargenomen, die overeenkomen met de capaciteit van de linker toeritstrook. Hoewel de curve voor de rechter toeritstrook dus onder die van de linker toeritstrook ligt, is het de vraag of de werkelijke capaciteiten niet gelijk zijn. Uit de hiaatmetingen volgt een oprijvolgtijd die voor de rechter toeritstrook nauwelijks hoger is dan voor de linker, maar de hoge effectieve waarde voor de oprijvolgtijd is er de oorzaak van, dat de curve voor de rechter toeritstrook onder die van de linker ligt. De curve voor de rechter toeritstrook moet dus, bij gebrek aan goede waarnemingen, duidelijk als een benadering worden beschouwd. De werkelijke capaciteit van de rechter toeritstrook van de zijtak van de turborotonde zal vermoedelijk hoger zijn.

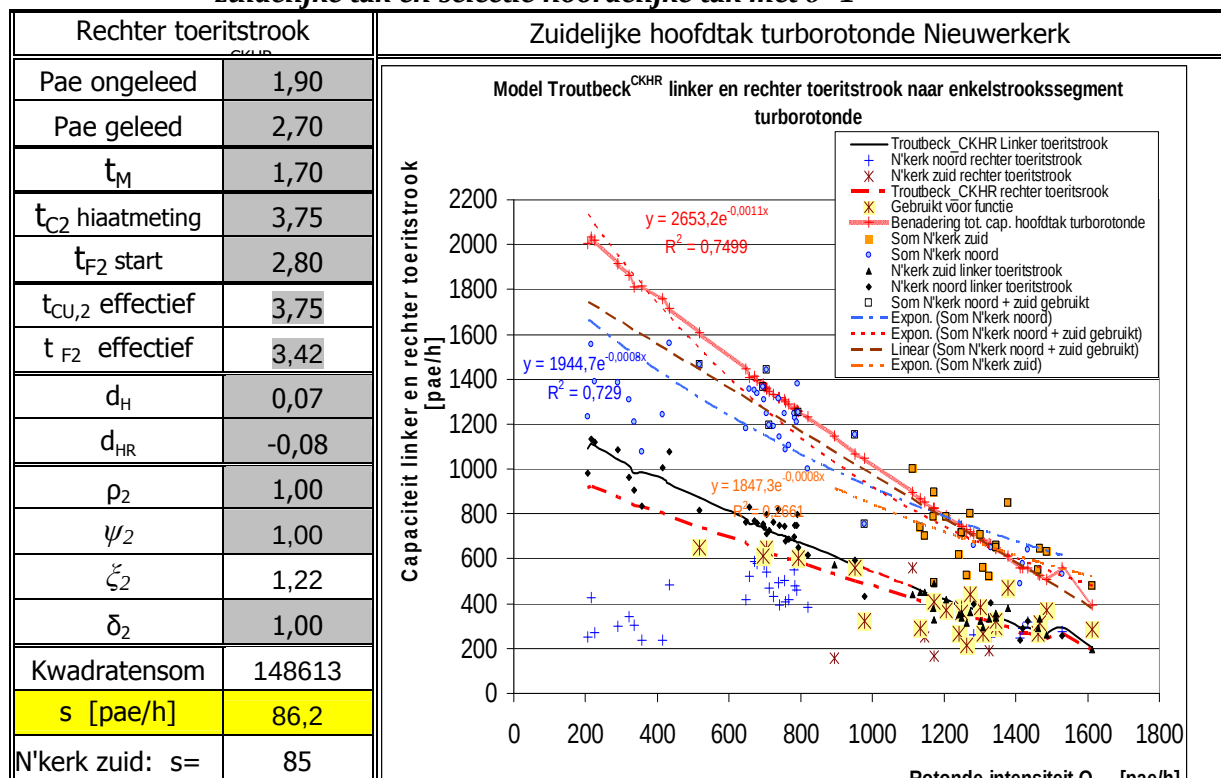
Rechter toeritstrook hoofdtak turborotonde

Op de rechter toeritstrook van de hoofdtak van de turborotonde zijn in het geheel geen capaciteitsmetingen beschikbaar. Alleen op de zuidtak van de rotonde Nieuwerkerk zijn metingen beschikbaar die vermoedelijk de capaciteit benaderen. Maar dat betreft metingen bij uitsluitend hoge rotonde-intensiteiten. De hoofdstroom vanaf de noordtak moest tijdens het onderzoek een keerbeweging maken, waardoor de intensiteiten op de rechter toeritstrook daar laag zijn. Omdat het waardebereik van de zuidtak te klein was, zijn deze aangevuld met enkele waarden van de metingen van de noordtak bij lage rotonde-intensiteiten. Daarmee is een benadering van de capaciteit van de rechter toeritstrook geschat. Zie Tabel F.4.30.

Tabel F.4.30 Schatting rechter rijstrook hoofdtak turborotonde Nieuwerkerk op data zuidelijke tak en selectie noordelijke tak



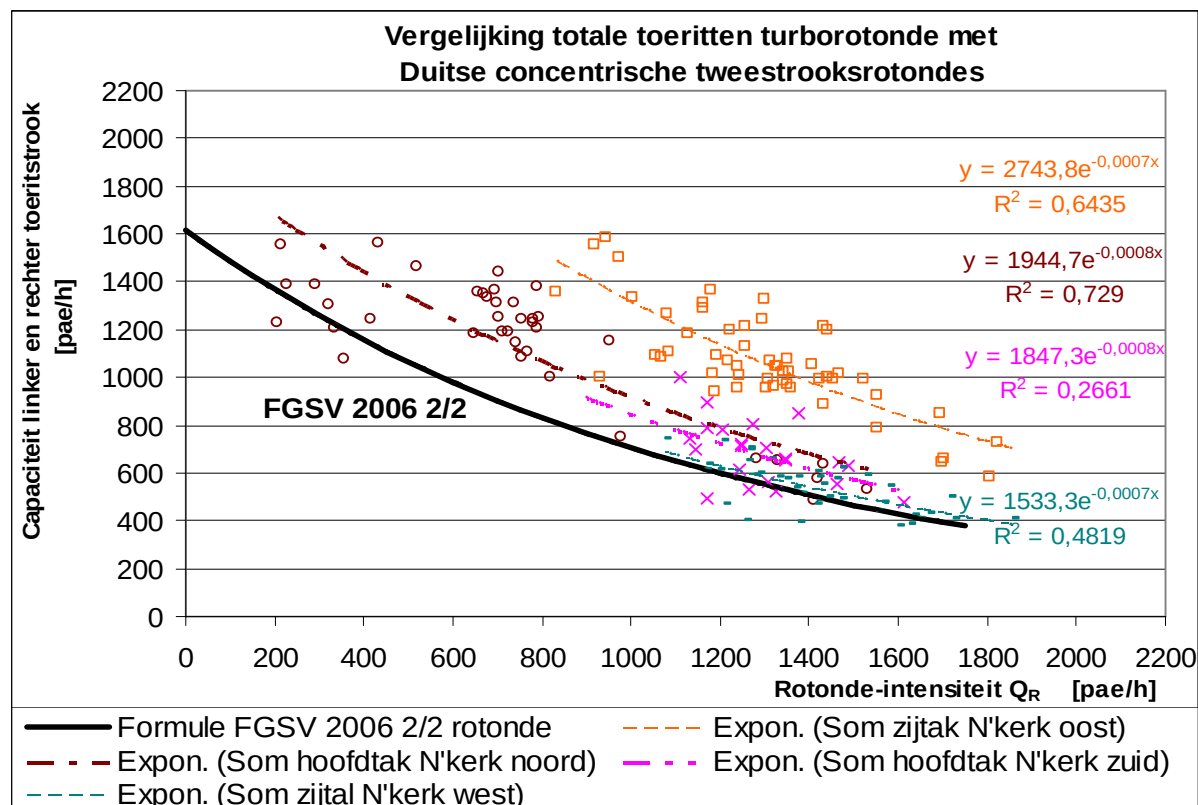
Tabel F.4.31 Schatting rechter rijstrook hoofdtak turborotonde Nieuwerkerk op data zuidelijke tak en selectie noordelijke tak met $\delta=1$



In Tabel F.4.31 is ten slotte een schatting gemaakt zonder gebruik te maken van de algemene correctiefactor δ . Verder is als startwaarde de oprijvolgtijd $t_F=2,8$ s/pae gebruikt. De resulterende waarde voor de oprijvolgtijd $t_F=3,42$ s/pae is echter onwaarschijnlijk hoog, zodat

ook van deze capaciteitscurve vermoed moet worden, dat die bij de lagere rotonde-intensiteiten een onderschatting van de werkelijke capaciteit van de rechter toeritstrook geeft.

F.4.7. Vergelijking toeritcapaciteit met die van concentrische tweestrooksrotondes



Figuur F.4-12 *Vergelijking capaciteit totale toeritten turborotonde met Duitse concentrische tweestrooksrotondes*

Toelichting bij Figuur F.4-12

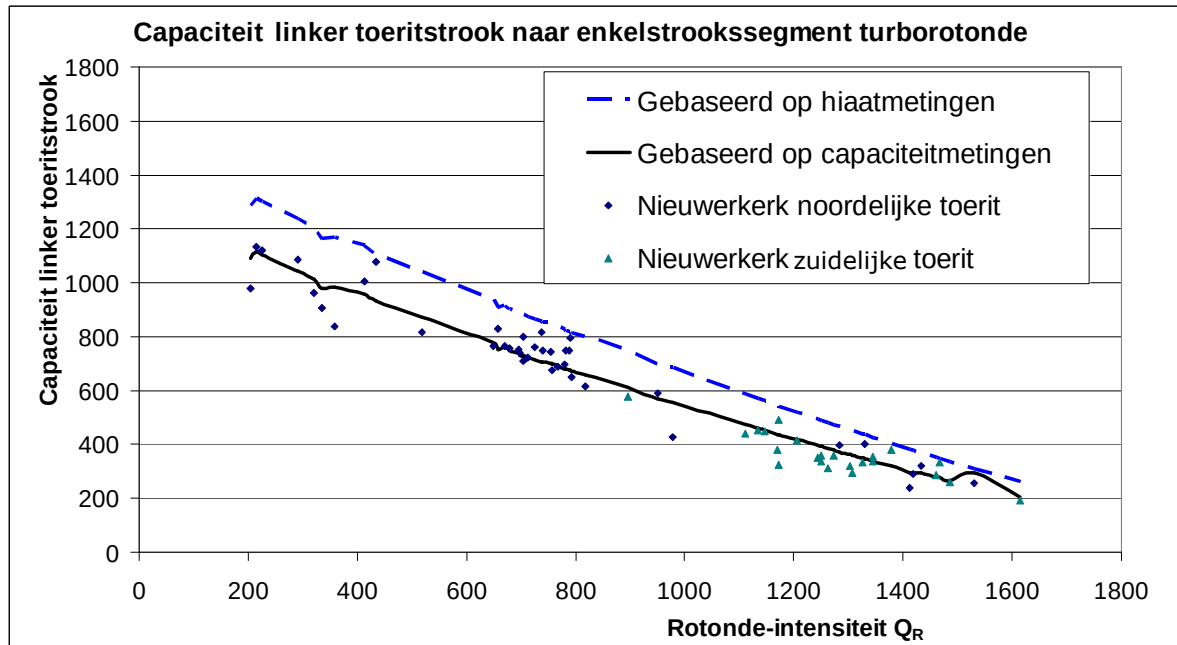
Figuur F.4-12 is gelijk aan Figuur 4.5-2, behoudens de weergegeven waarnemingspunten. De curve voor de capaciteit van (compacte) concentrische tweestrooksrotondes met enkelstrooks afvoertakken in Duitsland in Figuur F.4-12 is gemaakt met vergelijking (4.22), gebruikmakend van $n_e = 1,14$, $t_C = 4,3$ en $t_F = 2,5$ s/pae. Die komt overeen met een exponentiële trendlijn $y = 1641,6 \cdot e^{-0,00084 \cdot x}$.

Zowel op de zuidtak als de noordtak van de turborotonde Nieuwerkerk zijn de gemeten intensiteiten hoger dan het gemiddelde op de toeritten naar Duitse compacte concentrische tweestrooksrotondes.

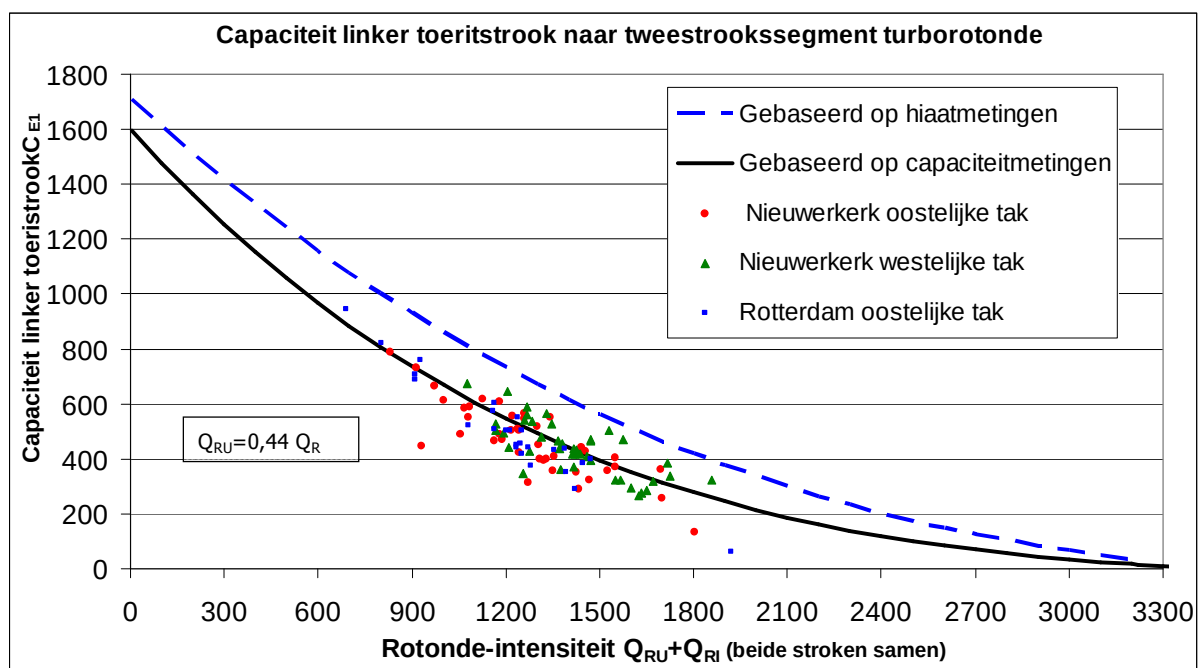
Op de zijtak is voor een goede benutting van de rechter toeritstrook voldoende rechtsafslaand verkeer nodig. Als die rechtsaf stroom klein is (22% op de westtak van rotonde Nieuwerkerk) is de benutting onvolledig. Opvallend is dat de geschatte trendlijn voor de totale toerit-intensiteit op die westtak (met $y = 1533,3 \cdot e^{-0,0007x}$ en $R^2 = 0,4819$) praktisch samenvalt met de Duitse capaciteitscurve. Zelfs bij weinig rechtsafslaand verkeer is de capaciteit van een zijtak van een turborotonde kennelijk niet kleiner dan het gemiddelde voor concentrische tweestrooksrotondes in Duitsland.

Ten slotte moet worden bedacht, dat de ligging van de curve die de totale capaciteit van de zijtak benadert, sterk afhangt van de verdeling van het rotondeverkeer over de beide stroken.

F.4.8. Verschil in resultaat hiaatschatting en capaciteitsschatting



Figuur F.4-13 Hoofdtak turborotonde: resultaten kalibratie op basis van hiaatmeting en capaciteitsmeting



Figuur F.4-14 Zijtak turborotonde: resultaten kalibratie op basis van hiaatmeting en capaciteitsmeting

Bijlage G. Vergelijking verkeersprestatie turboplein met viertakskruispunt⁵⁰

G.1. Maatgevende cyclustijd

G.1.1. Algemeen

Voor de prestatie van een verkeersregelininstallatie is het aantal richtingen dat gelijktijdig groen licht heeft, bepalend, mits er op die richtingen dan ook verkeersaanbod is. Duidelijk is, dat verkeersstromen die op één en dezelfde plaats (conflictvlak) elkaar kruisen niet tegelijkertijd groen licht kunnen krijgen (conflictgroep). Maar daarnaast bepaalt ook de afstand tussen de stopstreep en het conflictvlak de benodigde tijd tussen twee opeenvolgende richtingen die groen licht krijgen (ontruimingstijd). De fasevolgorde van de conflictgroep bepaalt de grootte van die ontruimingstijden. De fasevolgorde van de zwaarst conflicterende stromen is daarom van het grootste belang, maar niet alles bepalend. Ook is van belang in hoeverre andere richtingen ongestoord parallel kunnen lopen met de hoofdrichtingen. Hierop wordt nader ingegaan in G.2.3.

Op een turboplein liggen de conflictvlakken ruimtelijk gegroepeerd op vier onderscheiden deelkruisingen. Daardoor is het mogelijk dat richtingen die conflicterend zijn wanneer een plein als één geheel wordt beschouwd, gedurende een bepaalde tijd gelijktijdig groen kunnen hebben als ze per deelkruising worden beschouwd. Dit is van groot belang voor de keuze van een optimale regeling van een turboplein. Zie G.3.2.

G.1.2. Formule maatgevende cyclustijd

In de meeste verkeerslichtenregelingen vergen faseovergangen tijd in de regeling⁵¹. Deze tijd wordt de interne verliestijd van een conflictgroep (T_{int_k}) genoemd.

Deze interne verliestijd wordt door een aantal zaken bepaald:

- ontruimingstijden van de faseovergangen van richting i naar richting j ($OT_{i,j}$);
- de geeltijden (YT_i), waarbij de volgorde van i en j mede bepalend is;
- het gebruik van de eerste seconden geel door sommige automobilisten;
- startverliezen aan het begin van de groenfase.

Een gebruikelijke aanname is om het saldo van de laatste twee invloedsfactoren op nul te stellen: tegenover het startverlies staat het feit dat er ook auto's de eerste seconden geel de stopstreep passeren.

⁵⁰ De inhoud van deze bijlage is grotendeels gebaseerd op de publicatie: L.G.H. Fortuijn en A.M. de Leeuw: 'Turbopleinen met verkeerslichten; Verkeersregeling en -afwikkeling'. *Verkeerskundige Werkdagen 2003*, CROW, Ede 2003.

⁵¹ Er zijn uitzonderingen. Bijvoorbeeld in een tak-voor-tak regeling op een groot verkeersplein kunnen de faseovergangen een negatieve verliestijd opleveren, omdat de (in rijrichting bezien) voorliggende tak groen licht kan krijgen voordat de groenfase op de volgende tak wordt beëindigd.

Dan geldt: $Tint_k = \sum_{i,j \in k} OT_{i,j} + \sum_{i \in k} YT_i$ [s] (g.1)

De minimale groentijd in seconden die een conflictgroep per uur nodig heeft nodig heeft is gelijk aan $3600 \sum_{i \in k} \frac{Q_i}{CG_i}$ [s/h]

Hierin is:

CG_i : gemiddelde afrijcapaciteit (in een groenlichtuur) van rijstrook i [pae/h]

Q_i : de rijstrookintensiteit van richting i [pae/h]

De resterende tijd $Trest_k$ in dat uur kan worden verbruikt aan interne verliestijden.

$$Trest_k = \left(1 - \sum_{i \in k} \frac{Q_i}{CG_i} \right) \cdot 3600 \quad [s/h] \quad (g.2)$$

Hoe vaker de interne verliestijd $Tint_k$ in de resterende tijd geplaatst kan worden, hoe meer cyclussen per uur en dus hoe kleiner de benodigde cyclustijd TC_k voor conflictgroep k .

$$N_k = \frac{Trest_k}{Tint_k} \quad [\#/h] \quad (g.3)$$

$$TC_k = \frac{3600}{N_k} \quad [s] \quad (g.4)$$

Substitutie van (g.1) en (g.2) in (g.3) en (g.3) in (g.4) levert:

$$TC_k = \frac{\sum_{i,j \in k} OT_{i,j} + \sum_{i \in k} YT_i}{1 - \sum_{i \in k} \frac{Q_i}{CG_i}} \quad [s] \quad (g.5)$$

Hierin is:

$Trest_k$: de tijd die in een uur overblijft nadat daarvan de benodigde netto tijd voor het verwerken van alle verkeersstromen van conflictgroep k is afgetrokken [s/h]

$Tint_k$: de interne verliestijd van conflictgroep k in één cyclus [s]

N_k : het aantal cycli dat voor conflictgroep k in een uur beschikbaar is [# /h]

T_k : benodigde cyclustijd voor conflictgroep k [s]

TC_k : cyclustijd voor conflictgroep k [s]

TI_k : interne verliestijd van conflictgroep k [s]

$OT_{i,j}$: ontruimingstijd van de faseovergang van richting i naar richting j [s]

YT_i : geeltijd op richting i ; in de berekening wordt uitgegaan van 3 s [s]

Q_i : rijstrookintensiteit van richting i [pae/h]

CG_i : gemiddelde afrijcapaciteit (in een groenlichtuur) van rijstrook i [pae/h]

(in Engelstalige literatuur aangeduid met de letter s (saturation flow rate))

Hoewel ook waarden tot 2000 pae/h worden gemeten, wordt – gelet op allerlei onzekerheden – in dit verband gerekend met $CG = 1800$ pae/h.

De conflictgroep met de grootste benodigde cyclustijd is bepalend voor de benodigde cyclustijd voor het kruispunt⁵².

⁵² Voor een starre regeling heeft Webster (1958) voor de optimale cyclustijd de relatie $TC_k = (K \cdot TI_k + 5) / \{ 1 - \sum_{i \in k} (Q_i / CG_i) \}$ [seconde] afgeleid, waarin bij een belasting tot de capaciteit van een groenlichtuur $CG=1800$ [veh/h] de waarde $K=1,52$ hoort, afgerond tot $K=1,5$.

Theoretisch gezien neemt de capaciteit van een kruispunt toe met toenemende cyclustijd, omdat het aandeel van de interne verliestijd in de cyclus dan kleiner wordt. In de praktijk kan de cyclustijd echter niet oneindig groot worden, omdat de toeleidende wegen het kruispunt dan niet langer voldoende kunnen voeden, nog afgezien van het feit dat lange wachttijden maatschappelijk niet acceptabel zijn. De cyclustijd wordt in de berekeningen begrensd op 120 s, in formulevorm: $T < 120$ s.

Het is ook mogelijk om de interne verliestijd per conflictgroep uit te drukken als een fictieve belasting van het betreffende conflictvlak. Hiervoor geldt:

$$COK = \left[\frac{\sum_{i,j \in k} OT_{i,j} + \sum_{i \in k} YT_i}{TC_k} \right] \times CG_k \text{ [pae/h]} \quad (g.6)$$

Hierin is:

COK : capaciteitsverlies door de overgangen tussen de signaalgroepen (faseovergangen) van conflictgroep k in N_k cycli per uur, of m.a.w.: de claim die het interne verlies legt op de afrijcapaciteit van conflictvlak k [pae/h]

CG_k : capaciteit van conflictvlak k in een groenlichtuur [pae/h]

Als de afrijcapaciteit per richting verschilt, is de capaciteit van een conflictvlak afhankelijk van het aandeel van elk van die richtingen op dat conflictvlak. Hiervoor geldt dan:

$$CG_k = \left(\sum_{i \in k} \frac{Q_i}{CG_i} \cdot CG_i \right) / \sum_{i \in k} \frac{Q_i}{CG_i} = \sum_{i \in k} Q_i / \sum_{i \in k} \frac{Q_i}{CG_i} \quad (g.7)$$

Omdat in het vervolg gewerkt wordt met steeds dezelfde afrijcapaciteit voor alle richtingen, kan worden ingevuld: $CG_k = 1800$ pae/h.

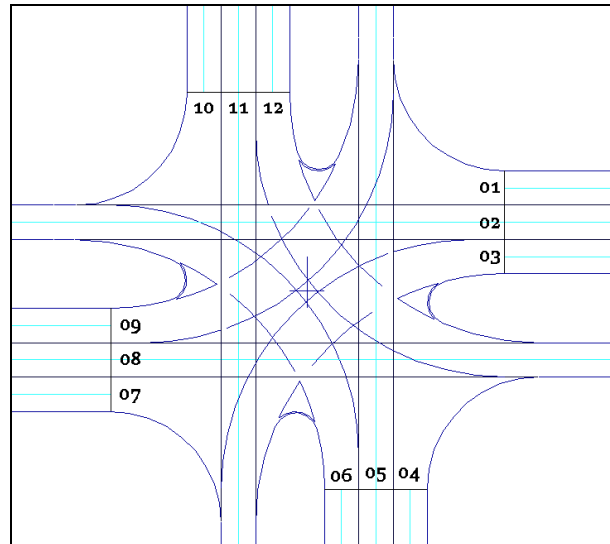
G.2. Verkeersprestatie viertakskruispunt

G.2.1. Keuze referentie viertakskruispunt

Een turboplein is ontwikkeld voor toepassing op zeer zwaar belaste kruispunten. Het 'basisontwerp' daarvan is getekend met op elke tak twee rechtsafstroken, twee rechtdoorstroken en twee linksafstroken. Voor een goede vergelijking van de verkeersprestatie is een referentie-viertakskruispunt gekozen met evenveel rijstroken per richting. Omdat het om een vergelijking tussen principeoplossingen gaat, blijven de fiets- en voetgangersvoorzieningen achterwege, nog afgezien van de overweging dat het oversteken van zes rijstroken uit veiligheidsoverwegingen problematisch is. Het viertakskruispunt bevat dus twaalf signaalgroepen met elk twee rijstroken.

Figuur G.2-1 toont een prinscheschets van het viertakskruispunt.

In de hiernavolgende prestatievergelijking wordt uitgegaan van verkeersafhankelijke verkeersregelinstanties. Ook daarin zullen stochastische processen de gemiddelde cyclustijd beïnvloeden (i. c. vergroten). Voor de eenvoud worden in deze studie alleen de kritieke cyclustijden gebaseerd op gemiddelde uurintensiteiten met elkaar vergeleken (in VRI-Gen als TC_{min} aangeduid, De Leeuw en Muller, 2005).



Figuur G.2-1 Principeschets viertakskruispunt met in alle richtingen twee rijstroken

G.2.2. Mogelijke combinaties van maatgevende conflictbelastingen op een viertakskruispunt

Op een viertakskruispunt komen de volgende combinaties van conflicterende verkeersstromen (conflictgroepen) voor, weergegeven door de vergelijkingen V1 t/m V8.

Afhankelijk van de grootte van de stromen is één van de volgende conflictgroepen maatgevend:

$$V1 = Q_9 + Q_5 + Q_1 + COV_1 \quad (g.8)$$

$$V2 = Q_8 + Q_4 + Q_{12} + COV_2 \quad (g.9)$$

$$V3 = Q_3 + Q_{11} + Q_7 + COV_3 \quad (g.10)$$

$$V4 = Q_2 + Q_{10} + Q_6 + COV_4 \quad (g.11)$$

$$V5 = Q_2 + Q_9 + Q_5 + Q_{12} + COV_5 \quad (g.12)$$

$$V6 = Q_8 + Q_3 + Q_5 + Q_{12} + COV_6 \quad (g.13)$$

$$V7 = Q_8 + Q_3 + Q_{11} + Q_6 + COV_7 \quad (g.14)$$

$$V8 = Q_2 + Q_9 + Q_{11} + Q_6 + COV_8 \quad (g.15)$$

Hierin zijn:

V1 t/m V8: capaciteitsclaim door de betreffende conflictgroep inclusief de verliezen door de faseovergangen op een conflictvlak van een viertakskruispunt [pae/h];

Q_1, Q_2, Q_3 , enz.: de intensiteiten van de richtingen 1, 2, 3, enz., gedeeld door het aantal rijstroken [pae/h];

COV_1, COV_2, COV_3 , enz.: het capaciteitsverlies door de overgangen tussen de signaalgroepen (faseovergangen) van de conflictgroepen 1,2, 3, enz. [pae/h].

G.2.3. Optimale fasevolgorde op een viertakskruispunt

Uit de vergelijkingen in paragraaf G.2.2 blijkt dat het maximaal aantal richtingen in een conflictgroep vier bedraagt (een conflictgroep is een combinatie van met elkaar onderling conflicterende groenfasen). Dat betekent, dat op een viertakskruispunt de groenfasen van alle richtingen ondergebracht kunnen worden in vier 'basislichtbeelden'. Een basislichtbeeld is een combinatie van een maximum aantal groenfasen die niet conflicteren. Een combinatie van basislichtbeelden in een bepaalde volgorde wordt ook wel een basisregeling genoemd.

Met de keuze van een basisregeling worden richtingen die onderdeel van verschillende conflictgroepen zijn, aan elkaar gekoppeld. Hierdoor ontstaan ‘schaduw-conflictgroepen’: richtingen die ieder op zich met elkaar niet conflicteren, maar dat via de lichtbeelden in de basisregeling wel doen. Deze schaduw-conflictgroepen kunnen maatgevend worden voor de cyclustijd. De kans dat een schaduw-conflictgroep maatgevend wordt, kan beperkt worden door de basisregeling zo te kiezen dat alle lichtbeelden die geen deel uitmaken van de basisregeling toch als een tussenstap tussen twee opeenvolgende basislichtbeelden geplaatst kunnen worden. Zo’n ‘tussenlichtbeeld’ moet dan voldoen aan de eis, dat het uitsluitend uit richtingen bestaat, die óf in het voorafgaande óf in het volgende basislichtbeeld voorkomen. Wil een verkeersregeling adequaat kunnen reageren op alle mogelijke fluctuaties in het verkeersaanbod, dan zal het ontwerp van de regeling zodanig moeten zijn, dat alle maximale groenfasecombinaties (lichtbeelden) gerealiseerd kunnen worden [Muller, 1995]. Het al dan niet voldoen aan deze voorwaarde bepaalt de flexibiliteit van de regeling⁵³. Hier is het begrip flexibiliteit dus niet als synoniem voor voertuigafhankelijk gebruikt. Een voertuigafhankelijke regeling hoeft niet flexibel te zijn.

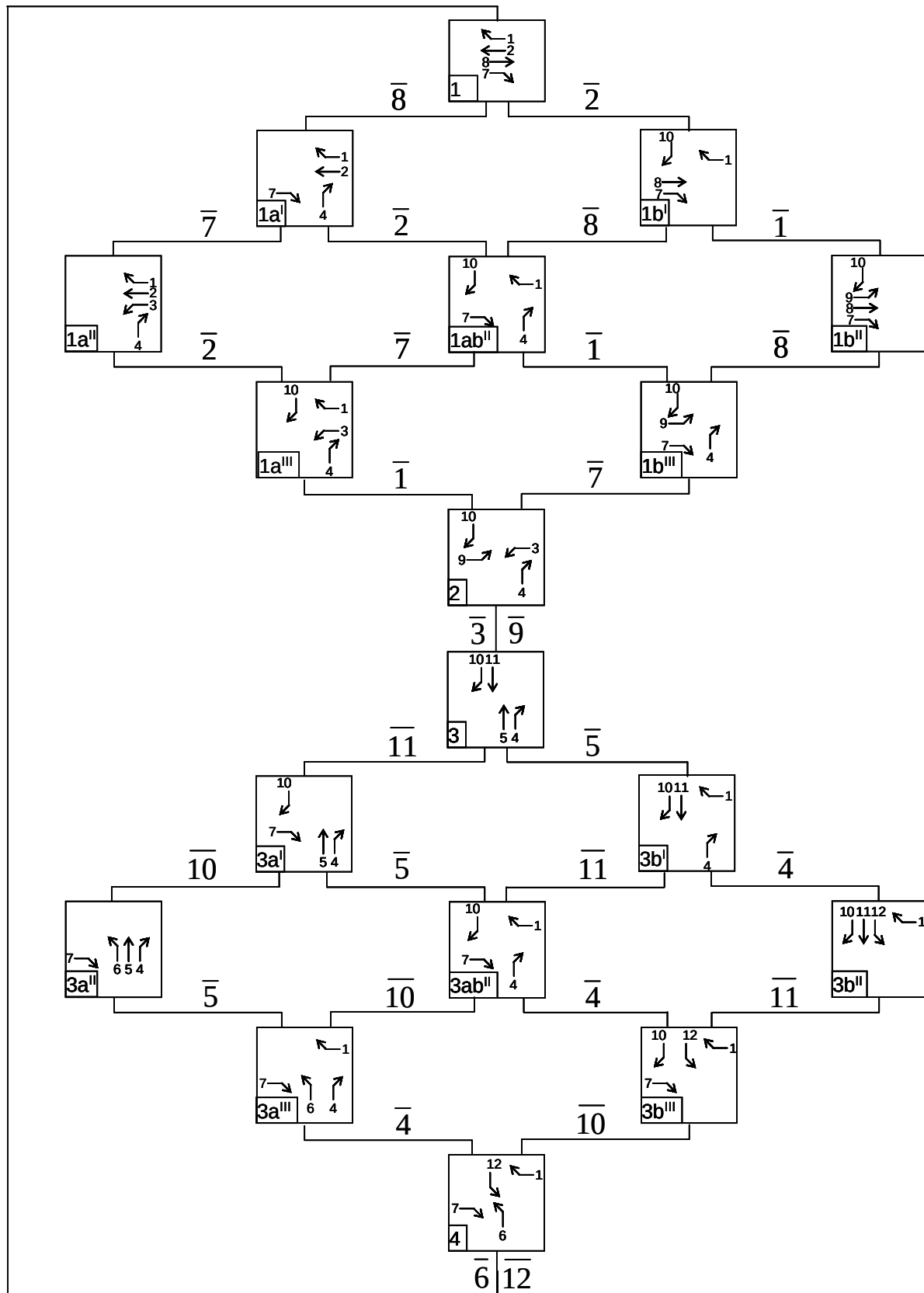
Voor de uiteindelijke keuze van de basisregeling zijn twee criteria van belang:

- de flexibiliteitseis (zoveel mogelijk lichtbeelden moeten als tussenlichtbeelden mogelijk zijn);
- de cyclustijd moet zo klein mogelijk zijn. Dit houdt in dat de maatgevende conflictgroep in een zodanige volgorde geplaatst moet worden dat de som van de ontruimingstijden zo klein mogelijk is.

Het met de hand opsporen van de meest optimale regeling is tegen deze achtergrond een zeer arbeidsintensieve aangelegenheid. In feite wordt de keuze dan veelal op basis van intuïtie gemaakt. Aan de TU-Delft is een programma ontwikkeld (de verkeersregelininstallatie generator = VRIGenerator, Muller en Knoppers, 2002 (melding), en Muller and De Leeuw, 2006), die de ontwerper daarbij op een systematische wijze behulpzaam is. Op basis van de afweging van bovengenoemde ontwerpeisen is voor het viertakskruispunt een regeling gekozen die kortweg wordt aangeduid met ‘linksaffers na hoofdrichtingen’. In het eerste blok (Figuur G.2-2) komen de rechtdoorrichtingen van de hoofdweg, in het tweede blok de linksaffers van de hoofdweg, vervolgens de rechtdoorrichtingen van de zijweg en in blok 4 de linksaffers van de zijweg. Deze fasevolgorde ziet er als volgt uit: $(1 \cup 2 \cup 7 \cup 8) \Rightarrow (3 \cup 4 \cup 9 \cup 10) \Rightarrow (4 \cup 5 \cup 10 \cup 11) \Rightarrow (1 \cup 6 \cup 7 \cup 12)$.

Een goed alternatief is de regeling ‘linksaffers voor hoofdrichtingen’; deze heeft het voordeel dat de hoofdrichtingen met elkaar kunnen meeverlengen. De keuze is hier niet op gevallen, omdat de regeling een iets langere cyclustijd heeft. Een ander alternatief is de tak-voortakregeling, waarbij elke tak afzonderlijk groen krijgt in een volgorde met de klok mee. Qua cyclustijd presteert deze regeling goed, maar qua flexibiliteit slecht. In deze regeling is namelijk nauwelijks plaats voor tussenlichtbeelden.

⁵³ Het woord ‘flexibiliteit’ wordt hier niet gebruikt in de betekenis van ‘verkeersafhankelijk’. In de betekenis waarin het hier wordt gebruikt, kan het ook worden aangeduid als de ‘robuustheid’ van de regeling, in de zin van het geschikt zijn voor het verwerken van verschillende belastingpatronen, te onderscheiden van de technische robuustheid van een verkeersregelininstallatie.



Figuur G.2-2 Fasediagram viertakskruispunt (linksaffers na hoofdrichtingen)

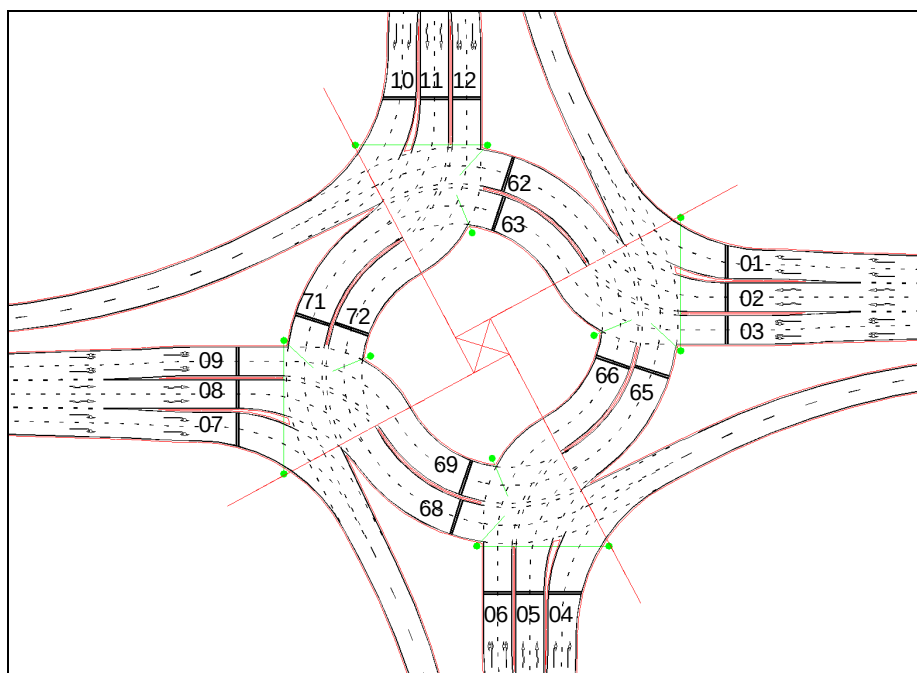
Deze volgorde combineert een hoge mate van flexibiliteit met een korte cyclustijd. Bovendien is deze volgorde zeer logisch voor verkeersdeelnemers. Het schema van de gekozen fasevolgorde, inclusief de tussenlichtbeelden, is weergegeven in Figuur G.2-2.

G.3. Verkeersprestatie turboplein

G.3.1. Configuratie turboplein

In Figuur G.3-1 is een schets opgenomen, die de configuratie van de beschouwde principeoplossing voor een turboplein weergeeft, met op iedere aanvoertak zes rijstroken.

De buitendiameter van het plein bedraagt 105 m. Als referentiemaat voor de lengte van de opstelvakken op het plein is de binnendiameter van de buitenste pleinbanen van belang. Deze bedraagt ca. 70 m.



Figuur G.3-1 Principeschets van een turboplein met in iedere richting twee rijstroken

G.3.2. Verkeersregeling op een verkeersplein

Een verkeersplein bestaat in feite uit een samenstel van deelskruispunten die op enige afstand van elkaar liggen. Een turboplein met vier aansluitende takken heeft 20 signaalgroepen (12 op de toeritten en 8 op de rotonde), er van uitgaande dat langzaam verkeer niet aanwezig is. De voedende richtingen hebben de nummers 01 t/m 12. De volglichten op het plein hebben de nummers 62, 63, 65, 66, 68, 69, 71 en 72 (het verkeerslicht op de toerit +60). Zie Figuur G.3-1.

De kracht van een plein t.o.v. een viertakskruispunt is het geringe aantal fasen waarmee elk deelskruispunt geregeld kan worden, twee i.p.v. vier fasen. Verder zijn de ontruimingstijden geringer dan bij een viertakskruispunt. Nadeel van het plein is dat de onderlinge deelskruispunten elkaar kunnen beïnvloeden, hetzij door wachtrijen van een stroomafwaarts deelskruispunt, hetzij door stagnatie van de aanvoer van een stroomopwaarts deelskruispunt.

Bij de opbouw van de regeling is de keuze welke richtingen gekoppeld worden, van grote invloed op de verkeersafwikkeling. Hierbij geldt het volgende dilemma:

- enerzijds vraagt beperking van de wachtrijlengte op het plein om zoveel mogelijk koppelingen van de verkeerslichten op de opeenvolgende deelskruisingen;

- anderzijds introduceert een koppeling extra conflicten voor de voedende richting. Bij een toenemend aantal koppelingen is daarom een toenemend aantal fasen nodig. Indien voor volledige koppeling gekozen wordt van alle volgrichtingen, is zelfs een vierfaseregeling noodzakelijk.

Gekozen wordt voor een regeling die zo min mogelijk fasen heeft, nl. twee stuks, met daarbinnen zoveel mogelijk koppelingen: alle voedende richtingen worden gekoppeld met het eerste volglicht. De rechtdoorrichtingen hebben zodoende een groene golf, terwijl de linksaffers opgevangen worden bij het tweede volglicht. Figuur G.3-2 geeft de fasevolgorde visueel weer.

In de eerste fase heeft het oost-west verkeer en het west-oost verkeer groen. De linksaffers (lichtnummers 02 resp. 09) worden opgevangen bij het *tweede* volglicht (lichtnummer 71 resp. 65). In de tweede fase heeft het noord-zuid verkeer en het zuid-noord-verkeer groen, nadat de linksaffers van de vorige fase weggereden zijn. Evenals bij de eerste fase worden de linksaffers weer opgevangen bij de tweede volgluchten.

Fase 1: de richtingen 01, 02, 03, 62, 63, en 07, 08, 09, 68, 69 zijn groen.

Fase 2: de richtingen 04, 05, 06, 65, 66, en 10, 11, 12, 71, 72 zijn groen.

NB: op een turboplein komen geen gecombineerde rijstroken voor, verkeer voor linksaf en rechtdoor zijn zodoende volledig gescheiden. Dit heeft het voordeel dat het linksaf verkeer over een grote opstelkans op het plein beschikt, namelijk circa de diameter van het plein. Gecombineerde rijstroken zouden deze mogelijkheid niet toestaan; het rekenmodel is dan ook niet geldig als gecombineerde rijstroken op het plein voorkomen.

Door Th.H.J. Muller (TU Delft, afstudeerverslag) is in de jaren zeventig een pleinregeling ontworpen, die het optimaal benutten van alle deelsluitingen tot uitgangspunt heeft. Voor grote pleinen is daarvoor nodig dat nadat op de lichtst belaste aanvoertak de groenfase is beëindigd (stel de richtingen 7, 8 en 9), een vaste tijd later ook de groenfase op de tegenover gelegen tak wordt beëindigd (ri.1, 2 en 3). Als dat niet gebeurt, is de kans groot, dat in de volgende fase op de zwaarst belaste deelsluiting (noordoost) de capaciteit niet volledig wordt benut omdat de aanrijtijd (ri. 5 en 6) te lang is.

Een turboplein is echter in vergelijking met de oude geregelde verkeerspleinen zo klein, dat de oprijtijd vanaf de conflicterende richtingen 5 en 6 niet groter is dan de geeltijd en ontruimingstijden van de richtingen 1, 2 en 3. Hierdoor kan de overgang van fase 1a naar fase 1a^{III} plaatsvinden nadat hiaten zijn gemeten in de richtingen, zonder risico op capaciteitsverlies. In vergelijking met de oorspronkelijke regeling van Muller kan de regeling hierdoor een onevenwichtige verdeling tussen de aanvoer op de tegenovergelegen takken beter verwerken.



Figuur G.3-2 Fasediagram turboplein met detail overgang van fase 1 naar fase 2

G.3.3. Mogelijke combinaties van maatgevende conflictbelastingen op de dealkruispunten van een verkeersplein

Evenals bij het viertakskruispunt zijn in het analytisch model formules opgesteld die de verkeersprestatie van een turboplein beschrijven. In Figuur G.3-1 zijn de verkeersstromen per dealkruising genummerd. Daarvoor geldt bijvoorbeeld dat $Q_{65} = Q_5 + Q_9$.

Wanneer de dealkruispunten onafhankelijk van elkaar worden beschouwd, zien voor de verschillende conflictgroepen de vergelijkingen voor het bepalen van de maatgevende capaciteit er als volgt uit (waarbij ten behoeve van het overzicht de nummering voor de verkeersstromen is aangehouden zoals die het plein oprijden):

$$R1 = Q_1 + Q_9 + Q_5 + COR_1 \quad (g.16)$$

$$R2 = Q_4 + Q_{12} + Q_8 + COR_2 \quad (g.17)$$

$$R3 = Q_7 + Q_3 + Q_{11} + COR_3 \quad (g.18)$$

$$R4 = Q_{10} + Q_6 + Q_2 + COR_4 \quad (g.19)$$

$$R5 = Q_2 + Q_9 + Q_5 + COR_5 \quad (g.20)$$

$$R6 = Q_5 + Q_{12} + Q_8 + COR_6 \quad (g.21)$$

$$R7 = Q_8 + Q_3 + Q_{11} + COR_7 \quad (g.22)$$

$$R8 = Q_{11} + Q_6 + Q_2 + COR_8 \quad (g.23)$$

$$R9 = Q_3 + Q_9 + Q_5 + COR_9 \quad (g.24)$$

$$R10 = Q_6 + Q_{12} + Q_8 + COR_{10} \quad (g.25)$$

$$R11 = Q_9 + Q_3 + Q_{11} + COR_{11} \quad (g.26)$$

$$R12 = Q_{12} + Q_6 + Q_2 + COR_{12} \quad (g.27)$$

$$R13 = Q_2 + Q_6 + COR_{13} \quad (g.28)$$

$$R14 = Q_5 + Q_9 + COR_{14} \quad (g.29)$$

$$R15 = Q_8 + Q_{12} + COR_{15} \quad (g.30)$$

$$R16 = Q_{11} + Q_3 + COR_{16} \quad (g.31)$$

$$R17 = Q_3 + Q_6 + COR_{17} \quad (g.32)$$

$$R18 = Q_6 + Q_9 + COR_{18} \quad (g.33)$$

$$R19 = Q_9 + Q_{12} + COR_{19} \quad (g.34)$$

$$R20 = Q_{12} + Q_3 + COR_{20} \quad (g.35)$$

Hierin zijn:

R1 t/m R20: capaciteitssclaim door de betreffende conflictgroep inclusief de verliezen door de faseovergangen op een –enkel – conflictvlak van een deelkruising van een verkeersplein [pae/h]

Q_1, Q_2, Q_3 enz.: intensiteiten van de richtingen 1, 2, 3 enz., gedeeld door het aantal rijstroken [pae/h]

COR_1, COR_2 , enz.: capaciteitsverlies door de overgangen tussen de signaalgroepen (faseovergangen⁵⁴) van de conflictgroepen 1, 2, enz. [pae/h].

G.3.4. Capaciteitsverlies op een turboplein

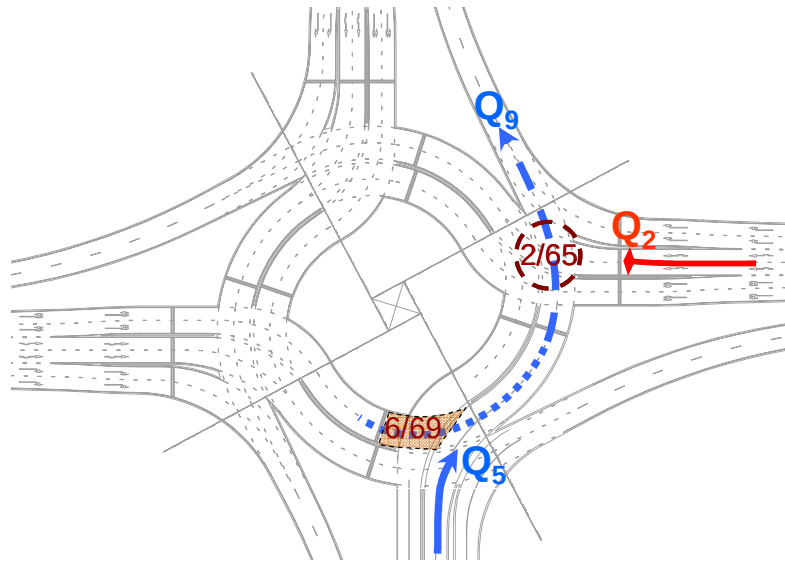
Het capaciteitsverlies op een plein wordt niet alleen door de faseovergangen (ontruimingstijden en geeltijden) per deelkruising bepaald, maar er kan ook sprake zijn van capaciteitsverlies door drie andere invloeden:

- 1) kortdurende stagnatie van de aanvoer vanaf een stroomopwaarts gelegen deelkruispunt door ontruimingstijden (aansluitverlies);
- 2) langdurige stagnatie van de aanvoer vanaf een stroomopwaarts gelegen deelkruispunt door wachtrijen (kwartsegmentblokkade);
- 3) limitering cyclustijd om het blokkeren van een stroomopwaarts gelegen deelkruising door linksafslaand verkeer te voorkomen (limitering cyclustijd door dubbelsegmentblokkade).

Aansluitverlies

Dit stagnatie-effect kan als volgt worden ingezien: Als in conflictgroep 2-9-5 (R5) richting 2 eindigt wordt richting 65 groen. Dit licht wordt allereerst gevoed door richting 9 en als dit verkeer verwerkt is, volgt richting 5. Normaal gesproken zal op het conflictvlak 2/65 een hiaat vallen tussen het verkeer vanaf 9 en 5. Slechts door de wachtrij voor 65 (vanaf 9) nauwkeurig te meten, kan dit verlies verminderd worden.

⁵⁴ Onderdeel hiervan zijn zowel de geeltijden als de ontruimingstijden (Muller et al, 2004).



Figuur G.3-3 Aansluitverlies

In de praktijk zullen er detectoren geplaatst moeten worden op conflictvlak 6/69, die ervoor zorgen dat richting 5 start zodra richting 9 conflictvlak 6/69 niet meer bezet. Om dit aansluitverlies als onderdeel in de ontruimingstijd te verdisconteren wordt de factor COR_k voor de formules 1 t/m 8 en 13 t/m 16 aangepast met de term AT (aansluittijd):

$$COR_k = \frac{\sum_{i,j \in k} OT_{i,j} + \sum_{i \in k} YT_i + \sum_{i \in k} AT_i}{TC_k} \cdot CG_k \quad (g.36)$$

Hierin is:

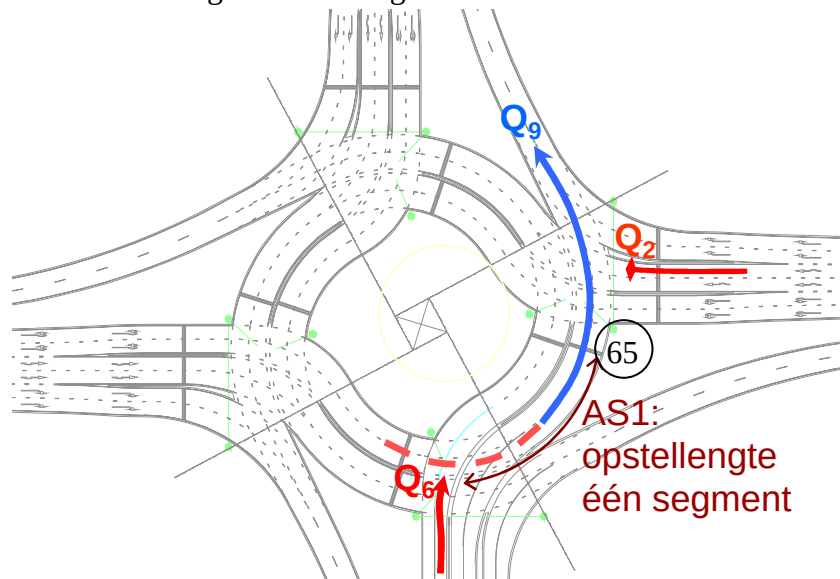
COR_k :	capaciteitsverlies door signaalovergangen in conflictgroep k	[pae/h]
TC	: cyclustijd	[s]
YT_i	: geeltijd op richting i ; in de berekening wordt uitgegaan van 3s	[s]
$OT_{i,j}$	: de ontruimingstijd van de faseovergang van richting i naar richting j	[s]
AT_i	: aansluitverliestijd als onderdeel van de ontruimingstijd	[s]
CG_k	: capaciteit van conflictvlak k in een groenlichtuur	[pae/h]

Kwartsegmentblokkade

Deze stagnatie van de aanvoer kan als volgt ingezien worden bij behandeling van formule R9: als richting 2 eindigt, zal in principe richting 6 starten; echter, het is mogelijk dat richting 6 geblokkeerd wordt door een wachtrij voor richting 65, die gevoed wordt door richting 9. Pas als de wachtrij voor richting 65 langer is dan een kwart van het pleinsegment minus de afstand tussen de stopstreep van richting 69 en de rechterkant van het conflictvlak met richting 6, treedt dit probleem op. De beschikbare opstelruimte uitgedrukt in personenauto-equivalenten wordt verder AS genoemd; AS1 duidt op het aantal mogelijk op te stellen voertuigen (uitgedrukt in personenauto-equivalenten) op een kwart segment.

In het analytisch model is de keuze gemaakt de hoeveelheid verkeer van richting 9 volledig mee te nemen bij de berekening van het stagnatie-effect, zodra de opstelruimte AS1 te klein is voor het verkeer van richting 9. Deze benadering vormt een overschatting van het effect. (In het geval de groentijd voor de richtingen 1, 2 en 3 korter is dan voor de richtingen 8 en 9 neemt bijvoorbeeld in tussenfase 1b de voorraad opgestelde auto's vanuit richting 9 af. Maar in dit onderzoek zijn dit soort verfijningen buiten beschouwing gebleven.)

Dit blokkade-effect zal alleen maatgevend worden als de intensiteit van de linksafrichting 6 groter is dan van de rechtdoorgaande richting 5.



Figuur G.3-4 Tijdelijke kwartsegmentblokkade

De formules R13 t/m R20 komen er als volgt uit te zien.

$$R13 = Q_2 + (Q_9 \text{ indien } q_9 \cdot T > AS1) + Q_6 + COR13 \quad (g.37)$$

$$R14 = Q_5 + (Q_{12} \text{ indien } q_{12} \cdot T > AS1) + Q_9 + COR4 \quad (g.38)$$

$$R15 = Q_8 + (Q_3 \text{ indien } q_3 \cdot T > AS1) + Q_{12} + COR15 \quad (g.39)$$

$$R16 = Q_{11} + (Q_6 \text{ indien } q_6 \cdot T > AS1) + Q_3 + COR16 \quad (g.40)$$

$$R17 = Q_3 + (Q_9 \text{ indien } q_9 \cdot T > AS1) + Q_6 + COR17 \quad (g.41)$$

$$R18 = Q_6 + (Q_{12} \text{ indien } q_{12} \cdot T > AS1) + Q_9 + COR18 \quad (g.42)$$

$$R19 = Q_9 + (Q_3 \text{ indien } q_3 \cdot T > AS1) + Q_{12} + COR19 \quad (g.43)$$

$$R20 = Q_{12} + (Q_6 \text{ indien } q_6 \cdot T > AS1) + Q_3 + COR20 \quad (g.44)$$

Hierin is:

q_i : de rijstrookintensiteit van richting i per seconde [pae/s]

$AS1$: de lengte van één pleinsegment minus de afstand tussen stopstreep en rechterkant conflictvlak (uitgedrukt in personenauto-equivalenten stilstaand en langzaam rijdend) [pae]

Limitering cyclustijd door dubbelsegmentblokkade

Blokkade van de afvoer door een stroomafwaarts gelegen deelskruispunt komt alleen voor bij de voedende linksafrichtingen; de rechtdoorrichtingen hebben immers een groene golf. De linksaffers worden opgevangen bij het tweede volglucht en hebben daardoor een opstelruimte die gelijk is aan ongeveer de halve pleindiameter, $AS2$ [pae].

Als voorwaarde kan nu gesteld worden dat een voedende linksafrichting per cyclus niet langer groen mag zijn dan de opstelruimte toelaat. In bijzondere gevallen kan deze eis echter te streng zijn. Het is immers mogelijk dat het tweede volglucht zo snel naar groen gaat, dat er zich geen wachtrij opbouwt. Dit geval doet zich voor als de tegenovergestelde aansluiting van het plein een lage verkeersbelasting heeft (tussenfase 1b is erg groot, terwijl de invloed

daarvan ook weer afhankelijk is of aan fase 1 fase 2a of fase 2b is voorafgegaan). Vanwege de complexiteit hiervan is in dit onderzoek die verfijning buiten beschouwing gelaten. In het gebruikte analytisch model wordt de robuuste eis gesteld, dat elke linksafbeweging niet langer groen mag zijn dan de opstellengte op twee segmenten AS2 [pae] toelaat.

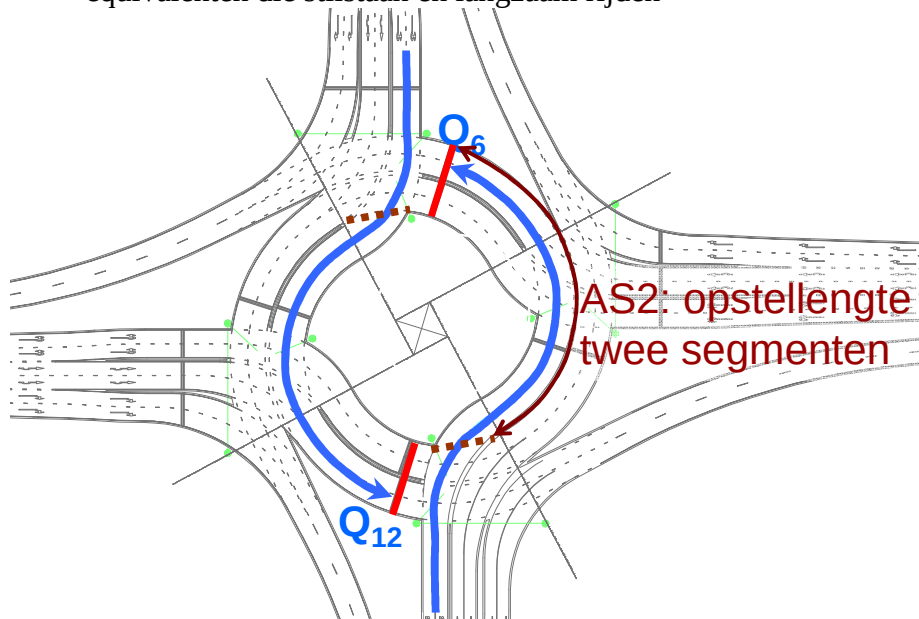
$$TC < \frac{AS2}{q_3} \wedge TC < \frac{AS2}{q_6} \wedge T < \frac{AS2}{q_9} \wedge T < \frac{AS2}{q_{12}} \quad (g.45)$$

Hierin is:

q_i : de rijstrookintensiteit van richting i [pae/s]

T : cyclustijd [s]

AS2 : de lengte van twee pleinsegmenten (bijvoorbeeld tussen de stopstreep van richting 62 en de linkerkant van de pleinbaan voor richting 65, enz.), uitgedrukt in personenauto-equivalenten die stilstaan en langzaam rijden [pae].



Figuur G.3-5 Dubbelsegmentblokkade

G.3.5. Maatgevende cyclustijd turboplein

De cyclustijd TC_k van elke conflictgroep moet inclusief het aansluitverlies voldoen aan de eis:

$$TC_k = \frac{\sum_{i,j \in k} OT_{i,j} + \sum_{i \in k} YT_i + \sum_{i \in k} AT_i}{1 - \sum_{i \in k} \frac{Q_i}{CG_i}} \quad (g.46)$$

Hierin is:

TC_k : cyclustijd voor conflictgroep k [s]

$OT_{i,j}$: ontruimingstijd van de faseovergang van richting i naar richting j [s]

YT_i : geeltijd op richting i ; in de berekening wordt uitgegaan van 3 s [s]

AT_i : aansluitingstijd [s]

Q_i : rijstrookintensiteiten gesommeerd over de richtingen i van conflictgroep k [pae/h]

CG_i : afrijcapaciteit van rijstrook i in een groenlichtuur [pae/h]

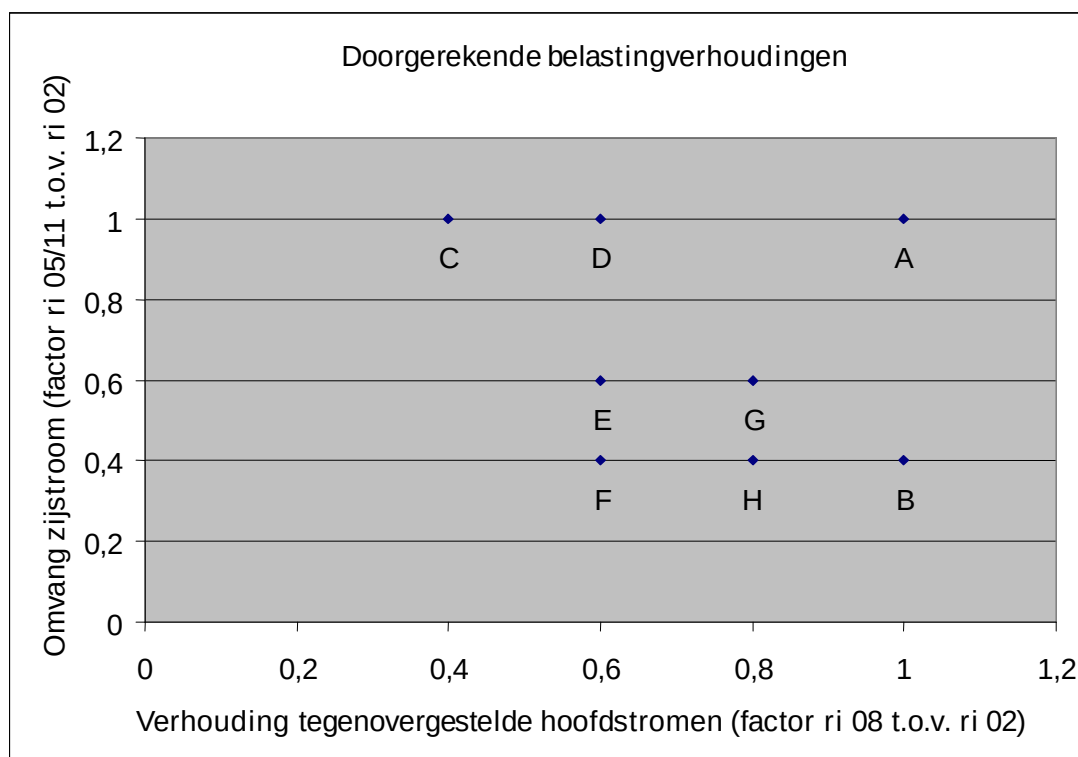
Evenals bij het viertakskruispunt wordt ook bij het turboplein de voorwaarde voor de maximale cyclustijd $TC < 120$ s gesteld. Maar de beperkingen genoemd in paragraaf G.3.4 stellen veelal eerder een grens aan de maximale cyclustijd.

G.4. Grafieken verkeersprestatie turboplein en viertakskruispunt

Voor elk van de twee verkeersoplossingen zijn voor 80 belastingvarianten steeds de verkeersstromen zover opgehoogd totdat een cyclustijd van 120 seconde werd bereikt of (voor het turboplein) totdat het maximum aantal pae in een opstelvak voor linksaf werd bereikt.

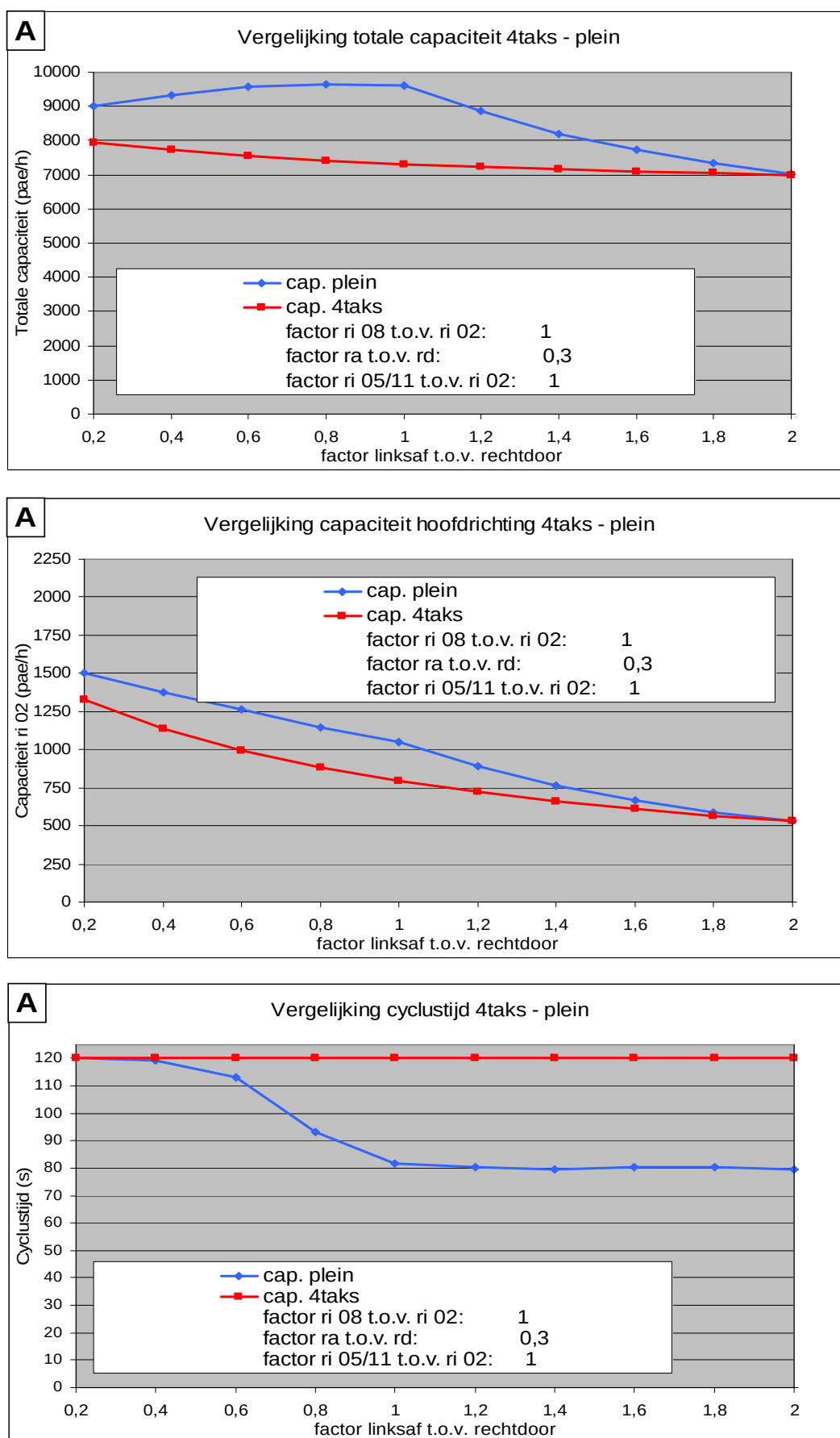
Acht groepen belastingvarianten zijn voor de verhoudingen tussen de twee tegenovergelegen hoofdrichtingen (08 t.o.v. 02) en de zijrichtingen 05 en 11 ten opzichte van de hoofdrichting 02 genummerd van A t/m H. Dit is in beeld gebracht in Figuur G.4-1.

Voor elk van deze belastingvarianten is in tien stappen verder nog gevarieerd met de verhouding linksaf / rechtdoor. Het resultaat van die berekeningen is te vinden in Figuur G.4-2 t/m Figuur G.4-9.

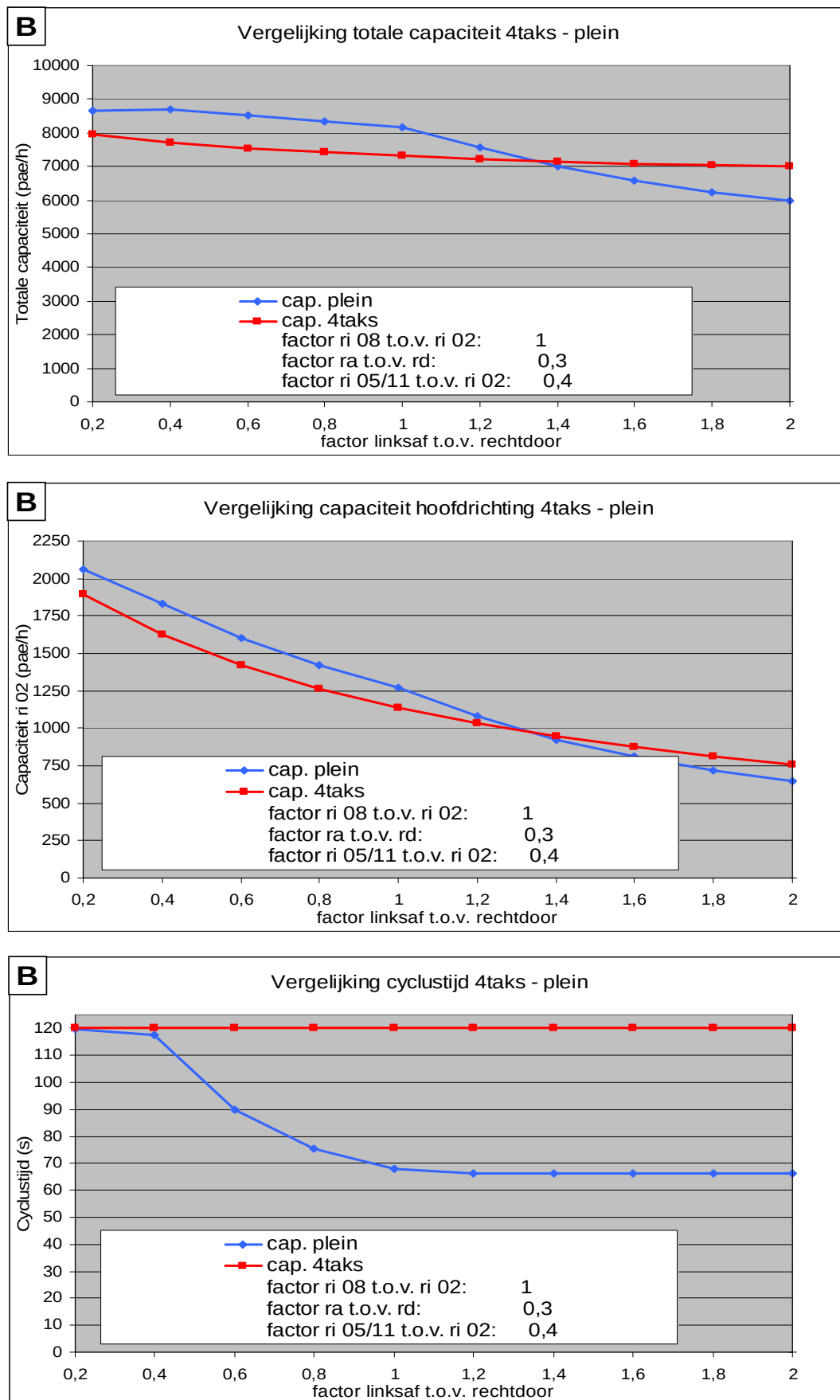


Figuur G.4-1 Groepen belastingpatronen A t/m H

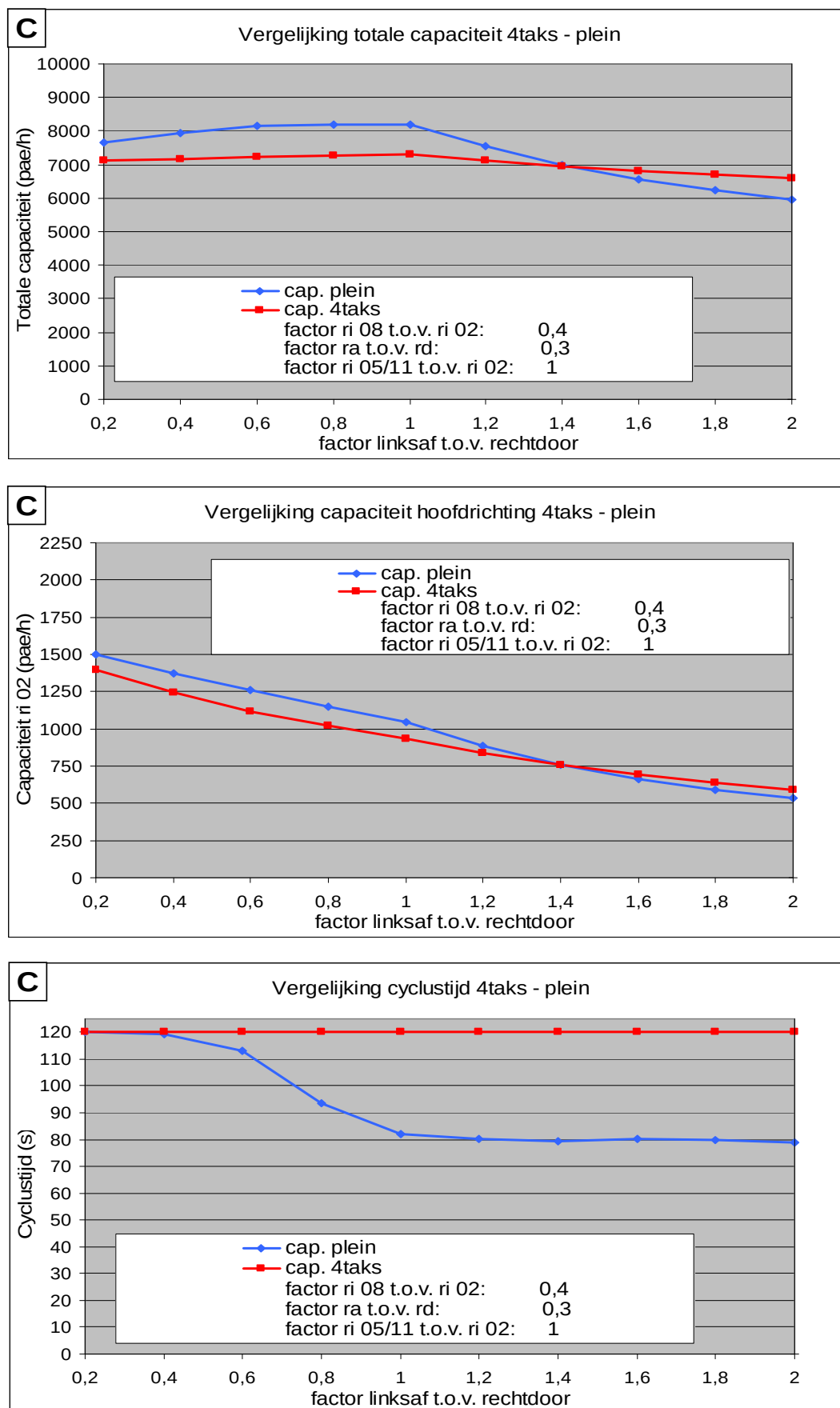
In de hoofdtekst is in Figuur 5.6-2 daarvan groep G weergegeven (Figuur G.4-8). Voor die groep belastingvarianten is in Figuur 5.6-2 voor één verhouding linksaf / rechtdoor (1:1) ook weergegeven hoe de cyclustijd toeneemt bij het steeds in dezelfde verhouding verhogen van de verkeersvolumes. Daarin is duidelijk te zien dat het viertakskruispunt bij een cyclustijd van 120 seconden dicht bij de limietwaarde van de sowieso te bereiken capaciteit zit, terwijl op het turboplein de cyclustijd wordt gelimiteerd door één van de voorwaarden genoemd in paragraaf G.3.4.



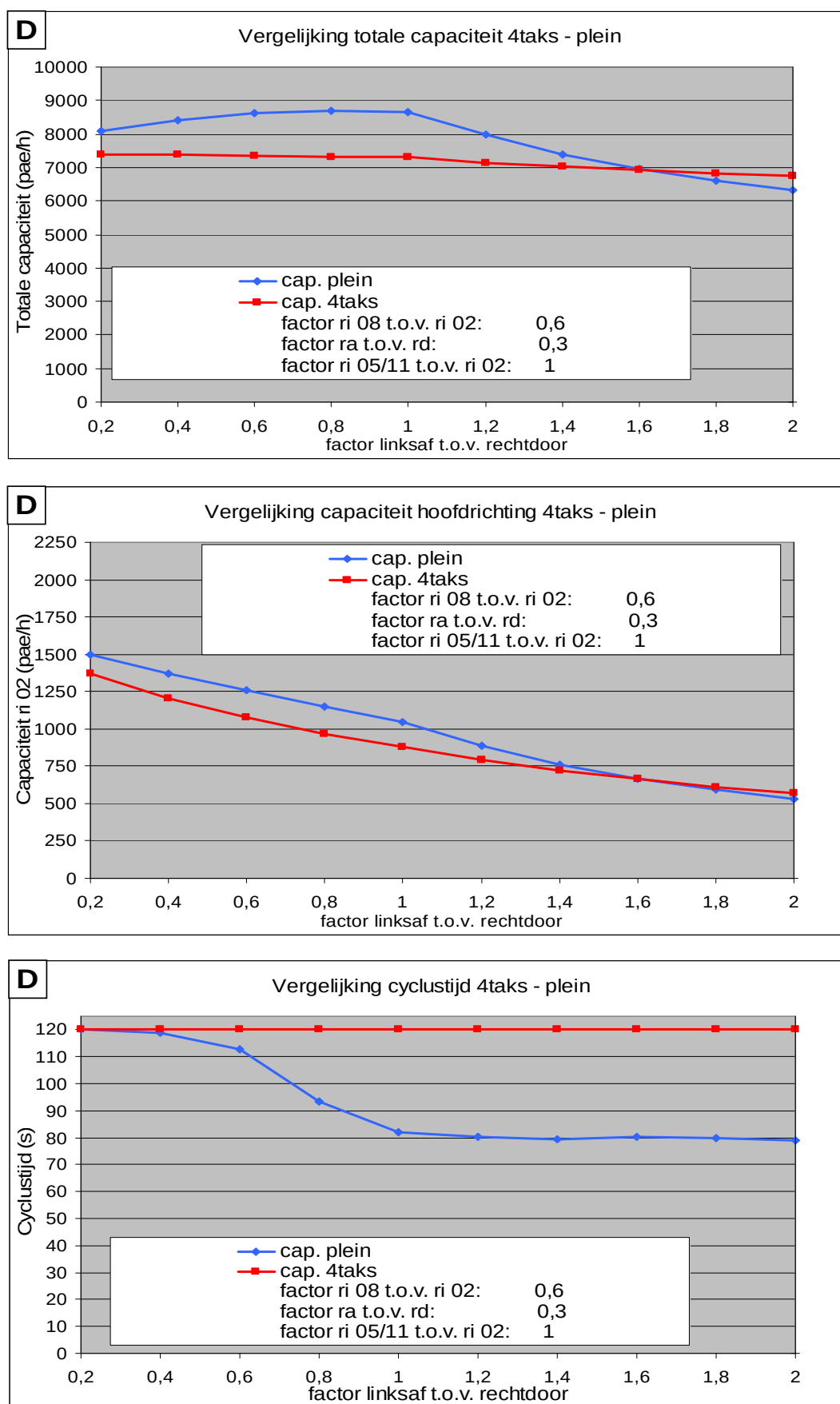
Figuur G.4-2 Belastingpatronen groep A



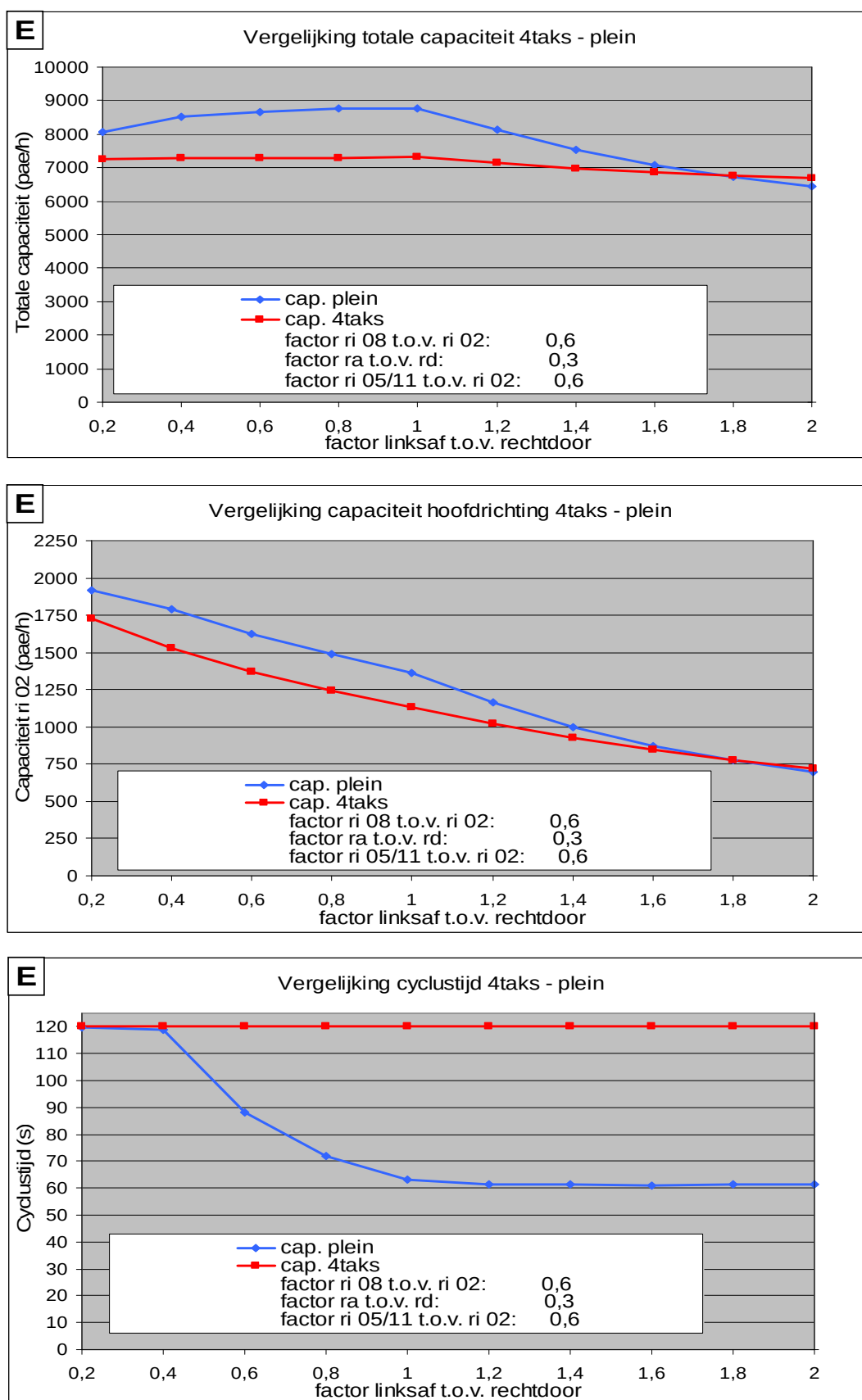
Figuur G.4-3 Belastingpatronen groep B



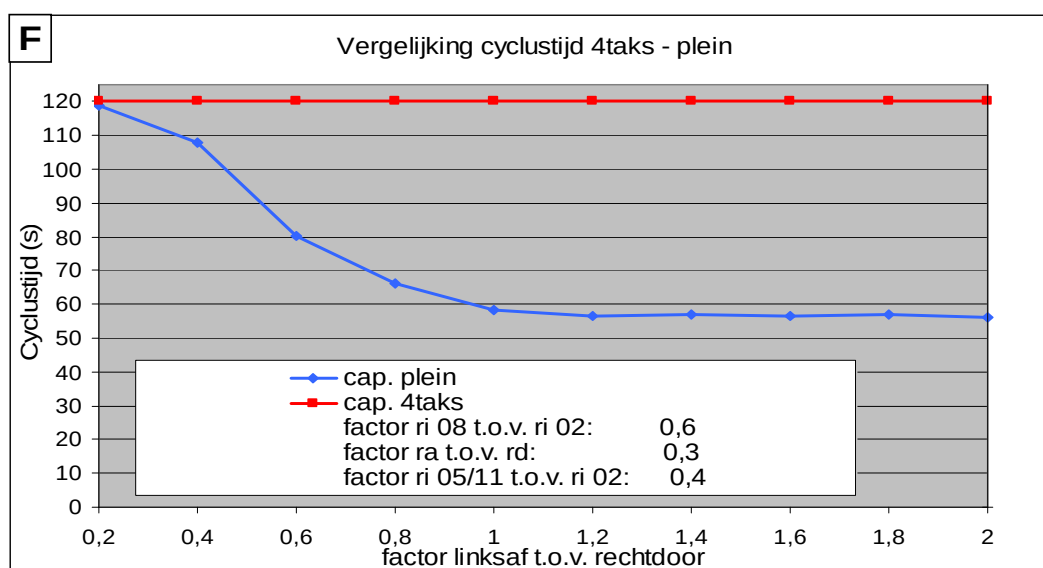
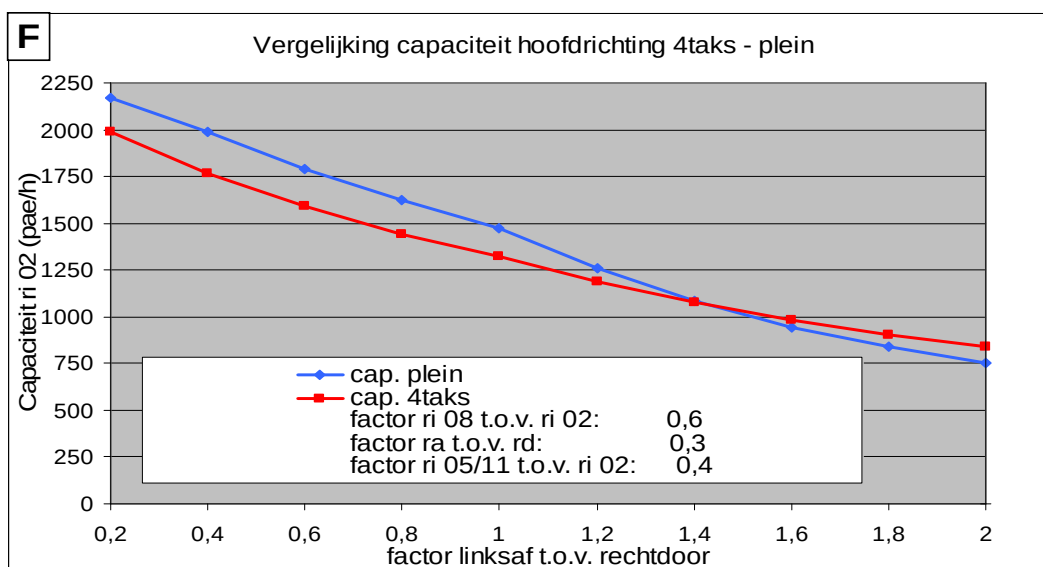
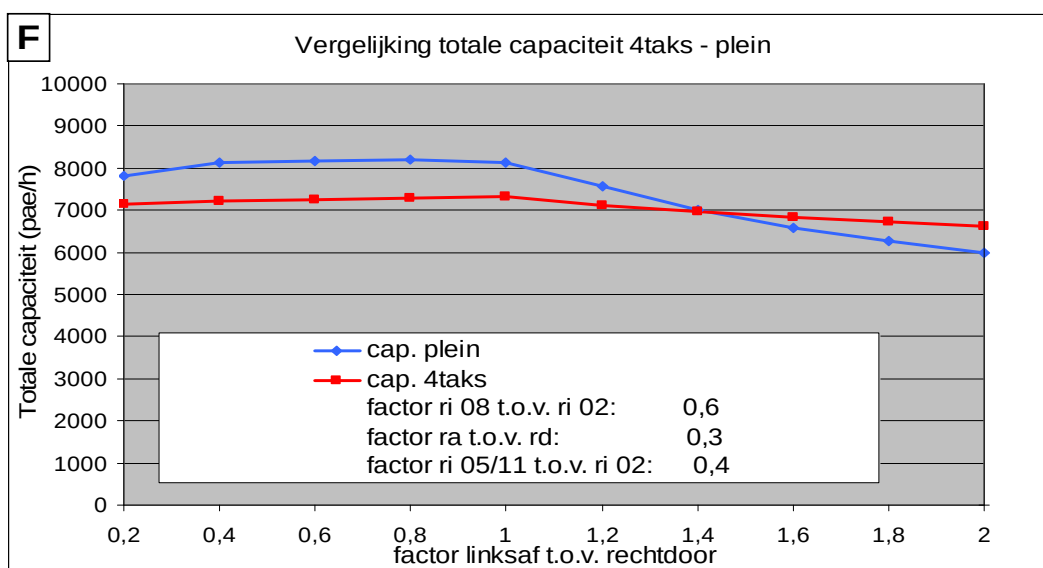
Figuur G.4-4 Belastingpatronen groep C



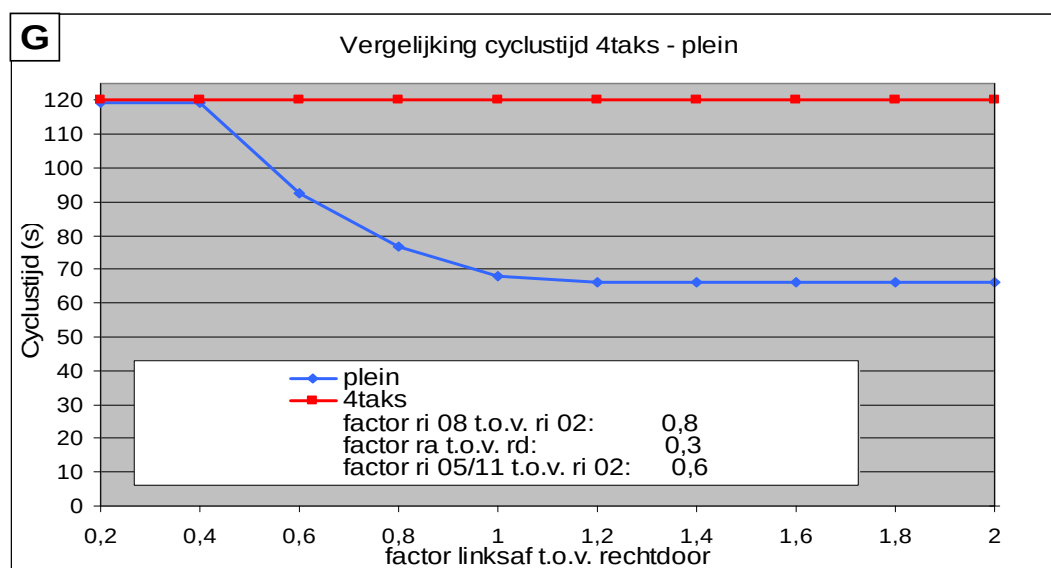
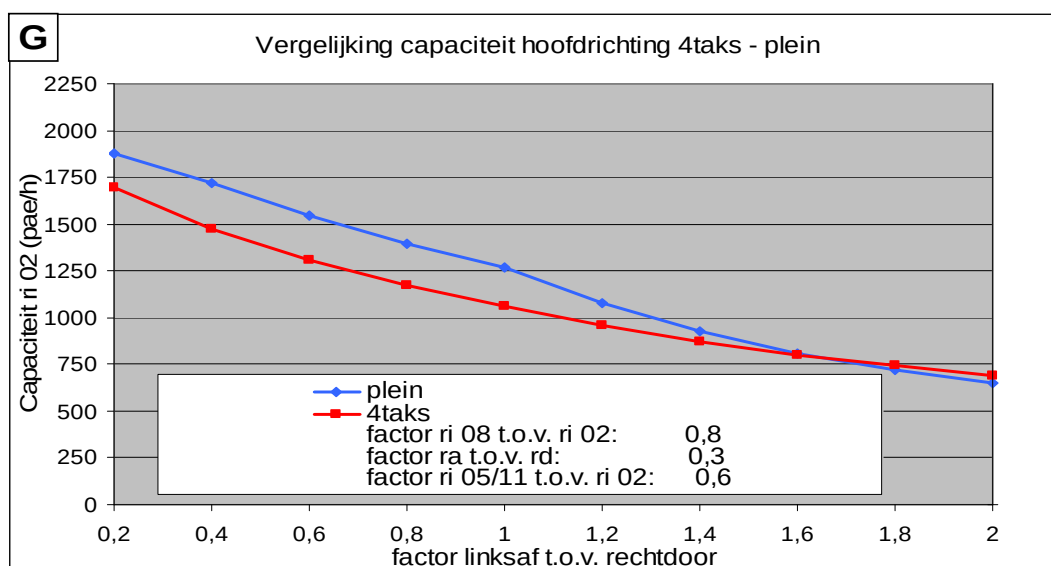
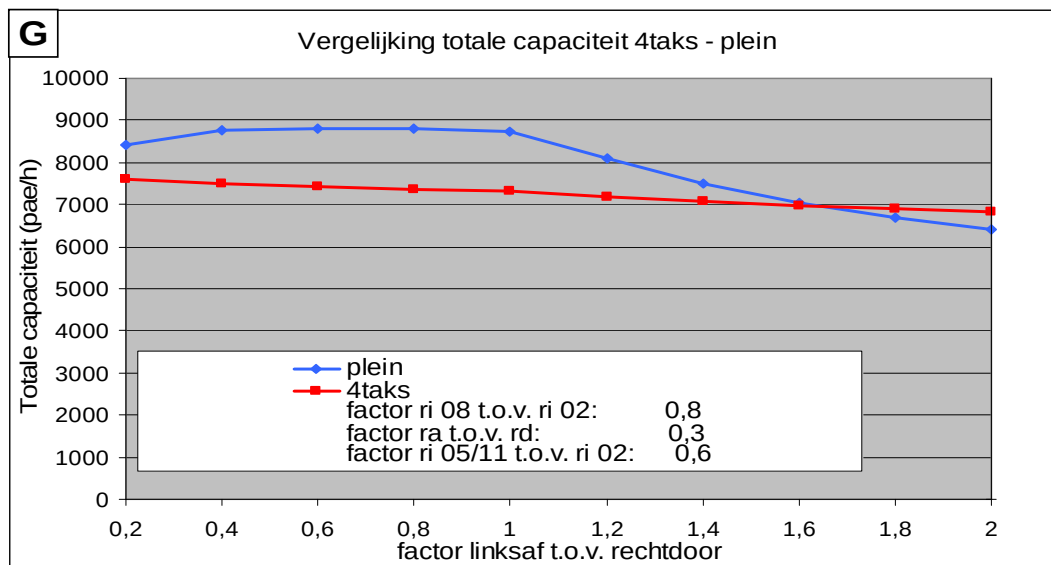
Figuur G.4-5 Belastingpatronen groep D



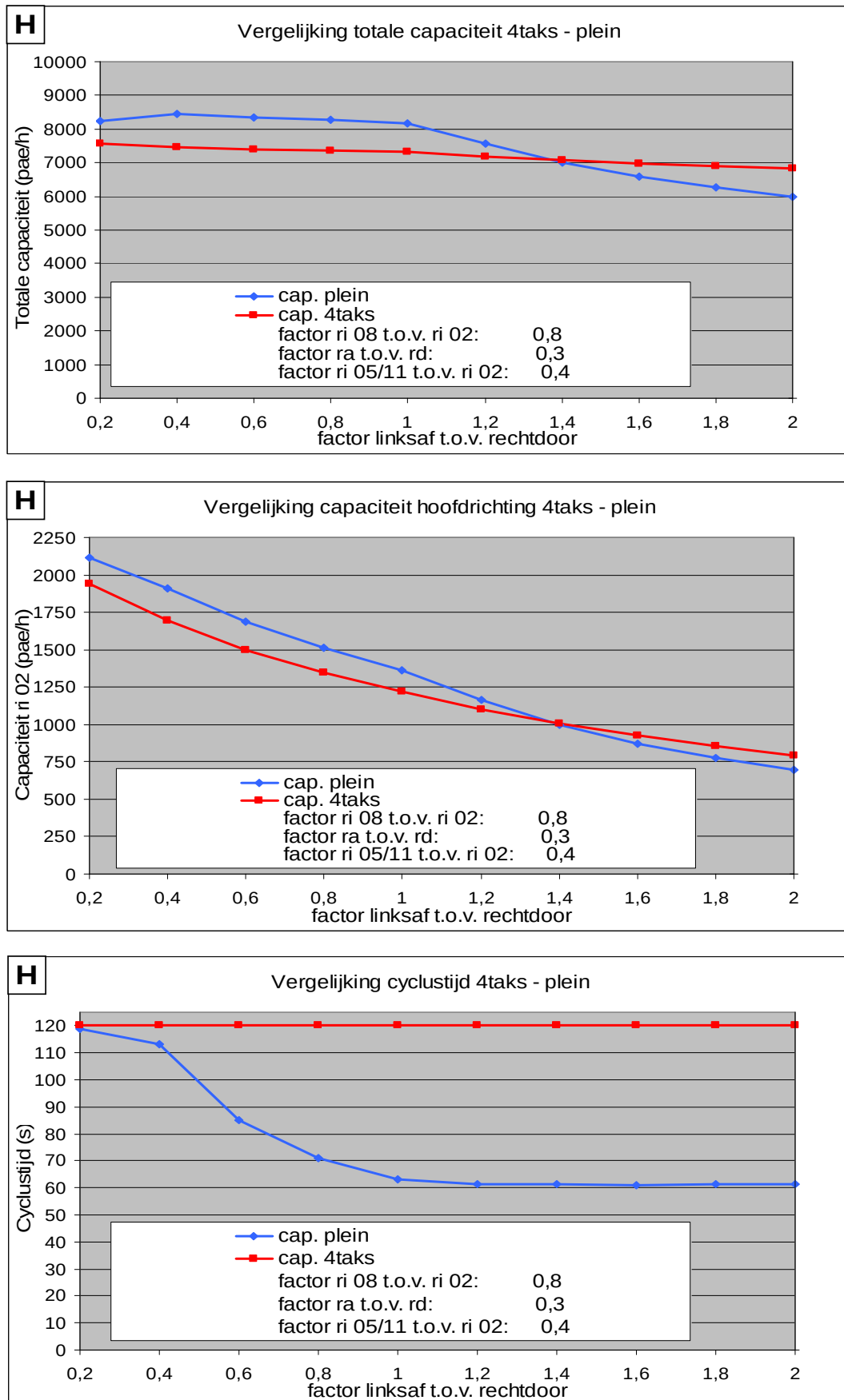
Figuur G.4-6 Belastingpatronen groep E



Figuur G.4-7 Belastingpatronen groep F



Figuur G.4-8 Belastingpatronen groep G



Figuur G.4-9 Belastingpatronen groep H

Bijlage H. Onderzoek voorwegwijzers turboplein

H.1. Achtergrond

Door de auteur is in een analyse van het onderzoek van TNO ‘*Evaluatie geregelde turbopleinen*’ (Horst, van der, e.a., 2008) geconstateerd, dat de respons op de vraag naar de overzichtelijkheid van de verschillende onderdelen van het turboplein door personenautobestuurders en vrachtautobestuurders nogal uiteen liep (Fortuijn, 2009d). Zie Tabel H.1.1.

Tabel H.1.1 *Respons op vraagstelling naar duidelijkheid en overzichtelijkheid van de situatie*

Voertuig	Beoordelingsaspect	Plein	Voorsorteren
Personenautobestuurders	Duidelijkheid	52,5 %	60 %
	Overzichtelijkheid	60 %	62,5 %
Vrachtwagenbestuurders	Duidelijkheid	76,9 %	76,9%
	Overzichtelijkheid	92,3 %	69,2 %

Twee dingen springen er uit. Voor personenautobestuurders scoort het voorsorteren zowel qua duidelijkheid als overzichtelijkheid hoger dan het berijden van het plein. Dat is niet het geval voor vrachtwagenbestuurders. Het verschil in score qua beoordeling van het plein houdt ongetwijfeld verband met de hoogte van de zitpositie van de bestuurders. De verkeerseilanden van 12 cm hoog bemoeilijken kennelijk voor personenautobestuurders het overzicht over het turboplein. Dit heeft geleid tot de aanbeveling in paragraaf 5.4 om deze verkeerseilanden niet hoger te maken dan 7 cm.

De score van de vrachtautobestuurders is qua duidelijkheid en overzichtelijkheid over het algemeen hoger dan die van de personenautobestuurders. Tegen die achtergrond is de score van de vrachtautobestuurders qua overzichtelijkheid van het voorsorteren opmerkelijk laag. Zeker in vergelijking met die van het plein. Het meest voor de hand liggend is, dat dit te maken heeft met de lengte van de voorsorteervakken, m.n. die tussen de turborotonde N471 / Landscheiding en het turboplein N207 / N471. Het is aannemelijk dat het kleinere acceleratievermogen van vrachtauto's hierin een belangrijke rol speelt. Het gebrek aan overzicht houdt kennelijk verband met het ontbreken van voldoende vroegtijdige informatie, dat – om op het plein linksaf te slaan – de linker strook op de aanvoertak het beste gebruikt kan worden. De conclusie die hieruit getrokken kan worden, is, dat korte voorsorteerstroken het gewenst maken dat bestuurders vroegtijdig over de noodzaak tot voorsorteren geïnformeerd worden.

Tegen deze achtergrond heeft de auteur voor zowel turborotondes als turbopleinen een nieuw type voorwegwijzer ontwikkeld. De essentie van die voorwegwijzer is, dat daarin informatie over de te kiezen voorsorteerstrook gecombineerd wordt met de afslagrichting op het plein, gegeven de bestemmingskeuze.

Dit type voorwegwijzer kan worden aangeduid als ‘strookwisselwegwijzer’ (Fortuijn, en Boender, 2010). In het Platform Bewegwijzering (CROW) werd relatief snel overeenstemming bereikt over de vorm van de strookwisselwegwijzers voor turborotondes, maar toepassing van hetzelfde principe voor het turboplein leidt tot een vrij complex symbool. Nadat hierop door Van der Horst (2010) werd gewezen, ging de voorkeur van de werkgroep uit naar een versimpelde vorm.

Algemeen is de CROW-werkgroep van mening dat nader onderzoek naar de functionaliteit van de verschillende alternatieven gewenst is, maar een financieringsbron hiervoor ontbrak. De Hogeschool Rotterdam (begeleider P.J. van Rijn) bleek echter bereid door een groep studenten als een praktijkopdracht hiernaar een onderzoek uit te laten voeren. Dit heeft plaatsgevonden in de periode april - juni 2011. Hierna wordt dit onderzoek (Ivo Boon, Mitch IJdo, Nils Jansen, Roderick Pegtel en Corne Rutten, 2011) samengevat.

H.2. Opzet van het onderzoek

De opdracht aan de studenten van de Hogeschool Rotterdam was een onderzoek uit te voeren met als doel om vast te stellen wat de meerwaarde is van een nieuw type voorwegwijzer, waarin naast de bestemming-richtingcombinatie ook de bestemming-manoeuvrecombinatie wordt getoond.

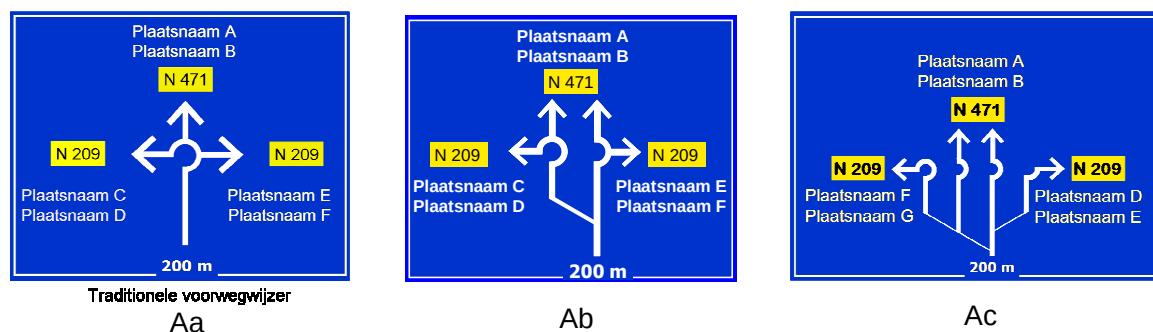
Beoordelingscriteria zijn:

- de reactiesnelheid;
- het foutenpercentage.

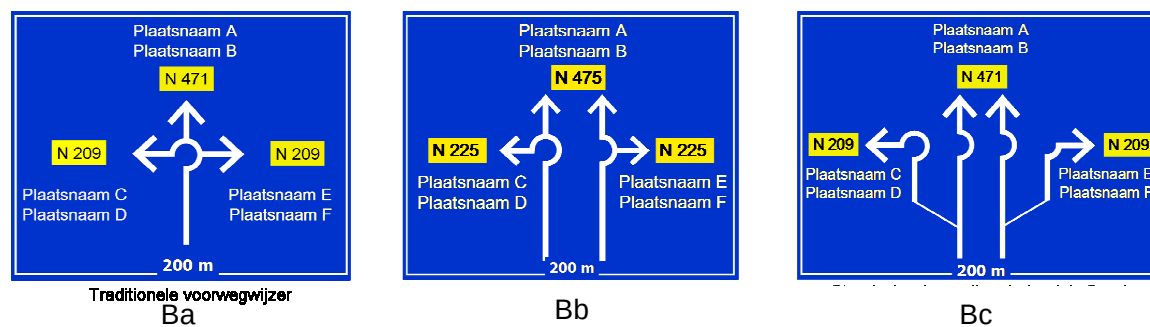
Onderzocht worden twee naderingssituaties:

- Nadering vanuit een enkelstrookstak: serie A
- Nadering van uit een tweestrookstak: serie B

Per serie zijn drie bordvarianten onderzocht:



Figuur H.2-1 Bordvarianten serie A



Figuur H.2-2 Bordvarianten serie B

Gekozen is voor een methode waarin de borden gecombineerd met de wegsituatie statisch aan de respondenten worden aangeboden. Figuur H.3-3 t/m Figuur H.3-5 geven een indruk van een eerste plaatje dat een respondent in het onderzoek aangeboden krijgt. Dit is de situatie ter plaatse van de voorwegwijzer op 200 m voor het begin van de voorsorteerstroken⁵⁵. De opdracht is om afhankelijk van de opgegeven bestemming, het scherm op de oranje stip aan te raken om de rijstrook van keuze aan te geven. Totdat het scherm is aangeraakt wordt dit plaatje getoond. De tijd tussen het tonen van dit plaatje tot aanraken wordt geregistreerd en ook of de combinatie van de opgegeven bestemming en de gekozen rijstrook fout of goed is.

Situatie op 200 m voor het nulpunt

Bij nadering op een aanvoertak met twee rijstroken doen zich op deze plaats twee varianten voor:

- er is geen pijlmarkering op de weg aanwezig (zie Figuur H.3-4);
- er is wel pijlmarkering op de weg aanwezig (zie Figuur H.3-5).

De eerste mogelijkheid kan zich bij alle bordvarianten voordoen. Omdat het symbool op de weg gelijk moet zijn aan het symbool op het bord, doet de tweede mogelijkheid zich alleen voor bij de bordvarianten Bb en Bc. In totaal levert dit vijf varianten op.

Bij nadering vanaf een enkelstrooks aanvoertak valt er op 200 m voor het nulpunt niets te kiezen. Daar is geen pijlmarkering op de weg aangebracht.

Ook in serie A is een stip op het scherm geplaatst, zoals in Figuur H.3-3 is weergegeven, zodat er voor de respondenten in beide series het automatisme in handelingen hetzelfde blijft. Qua situatie bij de voorwegwijzers doen zich dus acht varianten voor.

Situatie ter plaatse van het nulpunt

Het volgende en laatste plaatje dat wordt getoond, is de situatie ter plaatse van het nulpunt. Daar doen zich altijd twee mogelijkheden voor:

- 1) het portaal staat 130 m verderop en is niet goed zichtbaar;
- 2) ter plekke is wel een portaal zichtbaar (dat 130 m verderop herhaald wordt, maar dat heeft in het onderzoek geen rol gespeeld).

Figuur H.3-1 en Figuur H.3-2 laten het verschil zien.

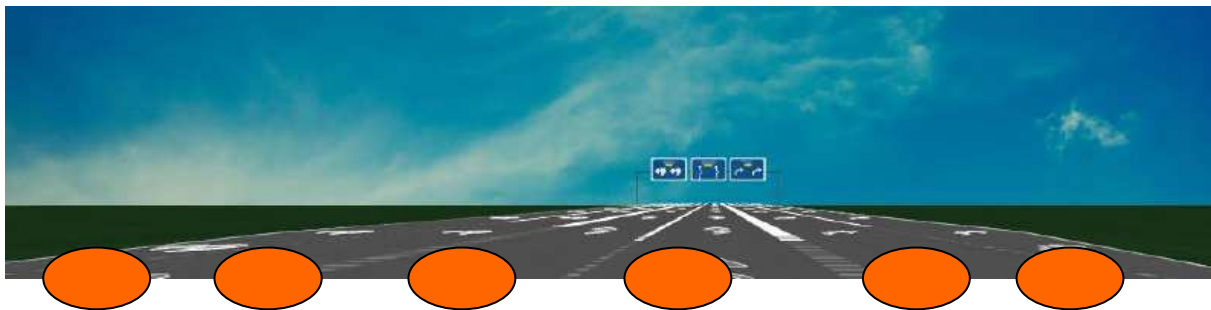
Dit betekent dat het aantal varianten theoretisch met twee wordt vermenigvuldigd. In totaal dus zestien varianten. Maar er is voor gekozen om het effect van de portaalwegwijzer alleen

⁵⁵ De plaats waar de weg zich verbreedt voor de voorsorteerstroken wordt het nulpunt genoemd.

te onderzoeken als de wegmarkering op de weg in overeenstemming is met het symbool op de voorwegwijzer. Dit betekent dat er veertien varianten van bord-pijlcombinaties over blijven. De varianten zijn door genummerd, met de codering volgens Tabel H.3.1.

Van elke variant krijgt een respondent twee plaatjes te zien: één op 200 m voor het nulpunt en één ter plekke van het nulpunt. Het plaatje ter plekke van het nulpunt varieert in serie B met de gekozen rijstrook. Daarin verschillen de voorbeelden links en rechts in Figuur H.3-1 en Figuur H.3-2 van elkaar. Dit maakt de beeldopbouw in het onderzoek wat complexer, maar op het aantal onderzoeksvarianten heeft dat geen invloed.

Nadat de beelden ter plaatse van het nulpunt waren gemaakt, bleek dat op ooghoogte van een bestuurder van een personenauto de gehele breedte van zes voorsorteerstroken niet goed was te overzien (zie Figuur H.2-3). Dat zou betekenen dat bestuurders op grond van de ervaring van voorgaande beelden op de gok hun tweede keuze zouden moeten maken.



Figuur H.2-3 Voorbeeld van het tweede plaatje zonder portaal dat een respondent te zien zou krijgen op ooghoogte van een bestuurder

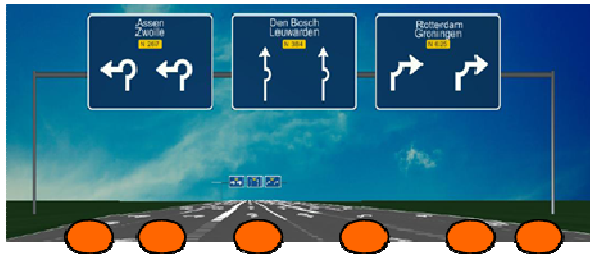
Daarom is besloten om voor een hoger camerastandpunt te kiezen.



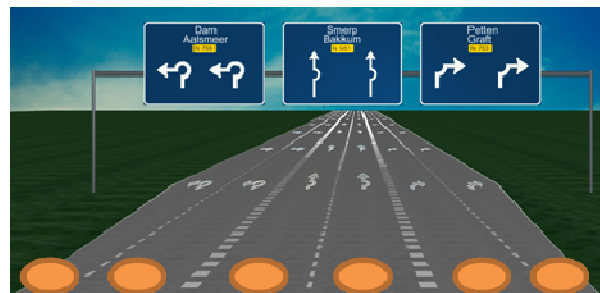
Figuur H.2-4 Voorbeeld van het tweede plaatje zonder portaal met hogere camerapositie, gebruikt in het onderzoek

Het voordeel van deze gewijzigde camerapositie is, dat voor de respondent nu duidelijk is welke rijstrook gekozen wordt. Het nadeel is echter, dat het overzicht over de strookindeling

zo goed wordt, dat naar verwachting de toegevoegde waarde van een portaal met besliswegwijzers in het onderzoek niet goed te meten is. Vergelijk het verschil tussen Figuur H.2-3 en Figuur H.2-5 met het verschil tussen Figuur H.2-4 en Figuur H.2-6.



Figuur H.2-5 Voorbeeld van het tweede plaatje met portaal dat een respondent te zien zou krijgen op ooghoogte van een bestuurder



Figuur H.2-6 Voorbeeld van het tweede plaatje met portaal met hogere camerapositie, gebruikt in het onderzoek

Behalve met

- het type voorwegwijzer,
 - de wegmarkering ter plaatse van de voorwegwijzer en
 - de voorwegwijzer ter plaatse van het nulpunt,
- (in totaal 14 varianten, verder aangeduid als bord-pijlcombinaties)

moet gevarieerd worden met nog twee aspecten:

- de opgegeven richting van de bestemming;
- de volgorde waarin de varianten worden aangeboden.

Immers, het is niet uitgesloten dat niet alleen de bord-pijlcombinatie op de reactietijd van invloed is, maar ook de richting die men moet kiezen: rechtsaf, rechtdoor of linksaf. Verder moet niet worden uitgesloten, dat er sprake is van een zeker leereffect, zodat ook de volgorde waarin de borden aangeboden worden niet voor iedereen gelijk moet zijn.

Om het aantal varianten te beperken, zijn er geen negen maar drie series van veertien varianten (bord-pijl combinaties) samengesteld. Per serie is per bord-pijlcombinatie niet alleen de opgegeven richting verschillend, maar ook de volgorde waarin een bord-pijlcombinatie wordt getoond. Het mag duidelijk zijn, dat door deze twee aspecten ineen te schuiven een flinke wissel op de betrouwbaarheid van de uitkomsten is getrokken.

Ten slotte zijn de respondenten nog in twee leeftijdscategorieën verdeeld:

- 18-55 jaar en
- 55+.

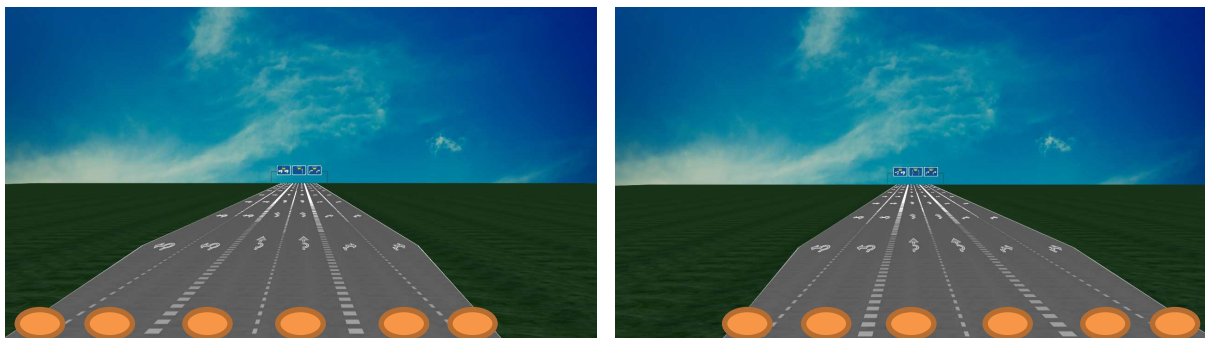
Elke serie is aan zeven respondenten per leeftijdscategorie op een touch screen getoond, met het verzoek steeds de knop van keuze aan te raken.

Het onderzoek is uitgevoerd in het gemeentehuis van Spijkenisse. De reactietijden zijn door een waarnemer met de hand genoteerd.

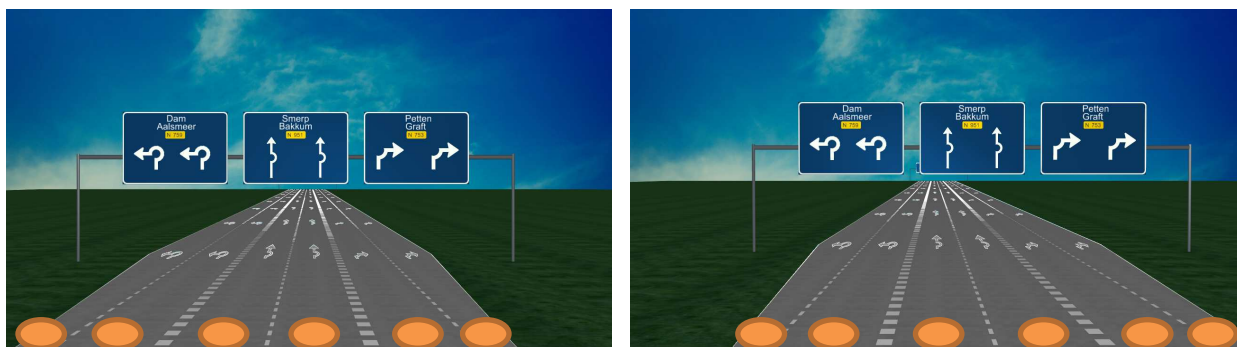
H.3. Onderzochte varianten

Tabel H.3.1 *Nummering varianten*

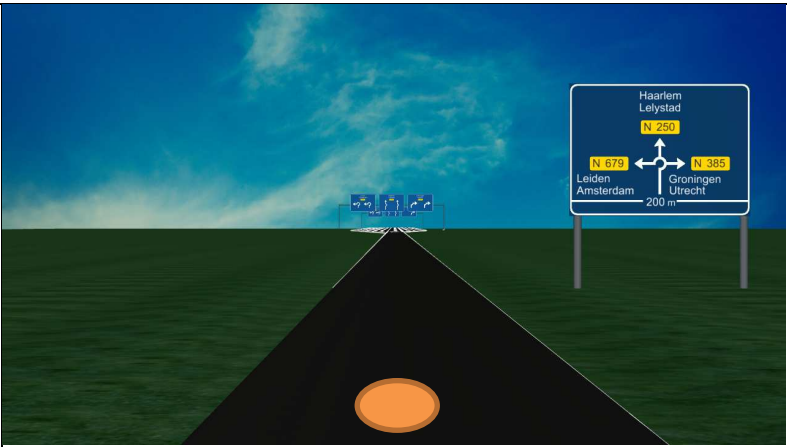
Nr. variant	Voorwegwijzer	Markering t.p.v. voorwegwijzer	Portaal bij nulpunt	Markering op voorsorteervakken .
A1	Aa	nee	nee (Figuur H.3-1)	ja
A2	Aa	nee	ja (Figuur H.3-2)	ja
A3	Ab	nee	nee (Figuur H.3-1)	ja
A4	Ab	nee	ja (Figuur H.3-2)	ja
A5	Ac	nee	nee (Figuur H.3-1)	ja
A6	Ac	nee	ja (Figuur H.3-2)	ja
B1	Ba	nee	nee (Figuur H.3-1)	ja
B2	Ba	nee	ja (Figuur H.3-2)	ja
B3	Bb	nee	nee (Figuur H.3-1)	ja
B4	Bb	ja	nee (Figuur H.3-1)	ja
B5	Bb	ja	ja (Figuur H.3-2)	ja
B6	Bc	nee	nee (Figuur H.3-1)	ja
B7	Bc	ja	ja (Figuur H.3-2)	ja
B8	Bc	ja	ja (Figuur H.3-2)	ja



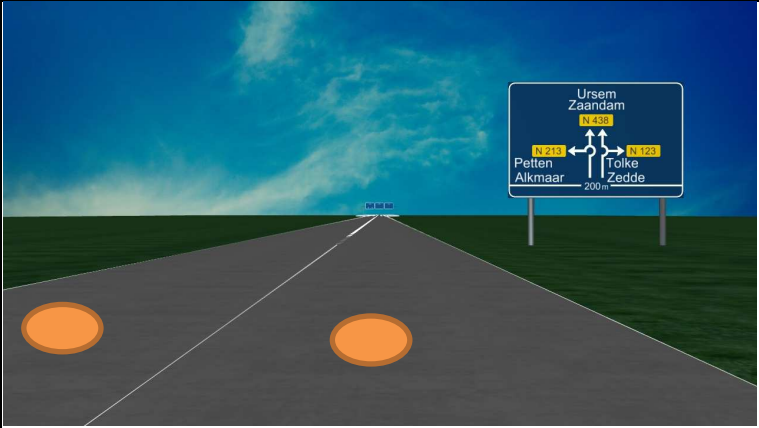
Figuur H.3-1 *Situatie bij begin voorsorteerstroken (nulpunt) zonder portaal met besliswegwijzers, gezien vanaf rechter respectievelijk linker aanvoerstrook (verhoogd camerastandpunt)*



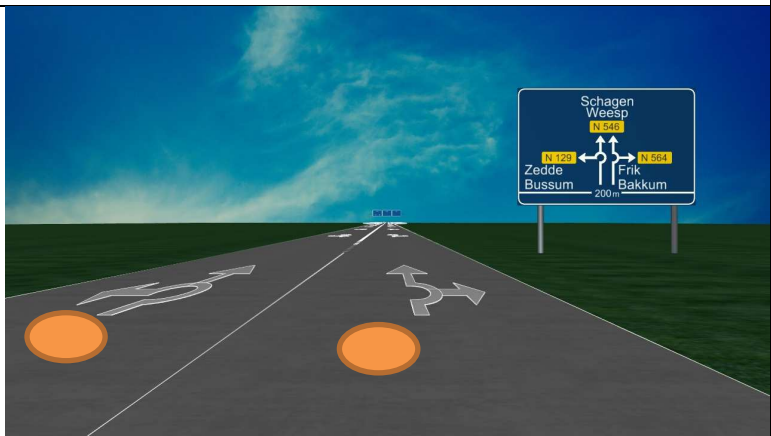
Figuur H.3-2 *Situatie bij begin voorsorteerstroken (nulpunt) met portaal met besliswegwijzers, gezien vanaf rechter respectievelijk linker aanvoerstrook (verhoogd camerastandpunt)*

Nadering vanaf enkelstrooks toevoertak	
Standaard voorwegwijzer Aa In varianten A1 en A2	
Eenvoudige strookwisselwegwijzer Ab In varianten A3 en A4	
Complexe strookwisselwegwijzer Ac In varianten A5 en A6	

Figuur H.3-3 Voorwegwijzer varianten enkelstrooks aanvoertak turboplein

Nadering vanaf tweestrooks toevoertak zonder wegdekpijlen	
Standaard voorwegwijzer Ba In variant B1	
Strookwegwijzer turborotonde als eenvoudige strookwisselwegwijzer Bb In variant B3	
Complexe strookwisselwegwijzer Bc In variant B6	

Figuur H.3-4 Voorwegwijzer varianten tweestrooks aanvoertak turboplein zonder pijlmarkering

Nadering vanaf tweestrooks toevoertak met wegdekpijlen	
Standaard voorwegwijzer	Niet van toepassing
Strookwegwijzer turborotonde als eenvoudige strookwisselwegwijzer Bb In varianten B4 en B5	
Complexe strookwisselwegwijzer Bc In varianten B7 en B8	

Figuur H.3-5 Voorwegwijzer varianten tweestrooks aanvoertak turboplein met pijlmarkering

H.4. Resultaten

De aanpassing van de voorwegwijzers is bedoeld om de keuze van de juiste voorsorteerstrook te vereenvoudigen. Daarom gaat het in het onderzoek vooral om de reactietijd en het foutpercentage ter plaatse van het begin van de voorsorteerstroken (nulpunt) onder invloed van verschillende voorwegwijzers.

Doordat per bord-pijlcombinatie er slechts zeven waarnemingen zijn, is in Tabel H.4.5 per cel de som van alle richtingen per bord-pijlcombinatie weergegeven. Voor de drie varianten per kolom is steeds de kans weergegeven dat de nulhypothese (de cellen per kolom verschillen niet) terecht verworpen wordt. (De variantieanalyse is uitgevoerd met de on-line calculator <http://www.danielxoper.com/statcalc/calcul07.aspx>). Deze kansen per kolom blijken nogal hoog te zijn. In het onderzoeksmateriaal blijkt de opgegeven richting – wellicht met de volgorde waarin een dergelijke variant wordt aangeboden – wel degelijk van invloed te zijn op de

reactiesnelheid. De omvang van de steekproef is echter te klein om hiernaar nader onderzoek te doen.

In de laatste kolom blijkt de kans op een terechte verwerping van de nulhypothese respectievelijk 36 en 47 % te zijn. Wel blijkt zowel bij nadering vanuit een enkelstrooks als vanuit een tweestrooks aanvoertak de middenvariant het laagste gemiddelde op te leveren.

Vanwege het hoge onbetrouwbaarheidsniveau, is in Tabel H.4.1 per voorwegwijzer aangegeven in welk percentage van de gevallen de betreffende variant de laagste reactietijd oplevert. De middenvariant blijkt ook dan in alle gevallen het hoogst te scoren.

Tabel H.4.1 Aandeel cellen reactietijd het kleinst in de betreffende rij

Vorm voorwegwijzer	Enkel-strooks toevoertak	Twee-strooks toevoertak	Beide vormen toevoertakken
Standaard voorwegwijzer	43%	39%	41%
Eenvoudige strookwisselwegwijzer / Strookwegwijzer turborotonde	57%	41%	47%
Complexe strookwisselwegwijzer	0%	20%	12%
$p\{H_0 = \text{kolomcellen gelijk}\}$	100%	100%	100%

Uit Tabel H.4.2 is duidelijk dat pijlen over 200 m op het tweestrooks gedeelte vóór het voorsorteervak zeer functioneel zijn om het aantal foutmanoeuvres op de tweestrooks aanvoertak van 6 te verlagen naar respectievelijk 1 (zonder portaal) en 0 (met portaal). Hierbij berust het verschil tussen 1 en 0 op toeval: een portaal verderop kan geen invloed hebben op de keuze op de aanvoertak. Ervan uitgaande dat het maken van foutmanoeuvres Poissonverdeeld is, is de kans dat de nulhypothese (dat de aanwezigheid van pijlen geen invloed heeft) onterecht verworpen wordt 0,3 %. Omdat het de vraag kan zijn of het blijven volgen van de rechter rijstrook zonder pijlmarkering als een fout moet worden aangemerkt, is een Poissonverdeling discutabel. Maar ook toepassing van de Contingentietabel (met continuïteitscorrectie van Yates (Crow et al, 1960, par. 4.6) laat een significant resultaat zien ($p = 5,8\%$). Zie Tabel H.4.4 (Mollet, e.a., 2004).

Voor het overige zijn er qua foutpercentages geen significante verschillen af te leiden.

Tabel H.4.2 Aantal fouten in rijstrookkeuze

Enkelstrooks toevoertak						
leeftijdscategorie	Foute keuze rijstrook aanvoertak			Foute keuze voorsorteerstrook		
Vorm voorwegwijzer	alleen pijlen voorsorteer-vakken	ook pijlen op aanvoertak	ook portaal aan begin voorsorteer-vakken	alleen pijlen voorsorteer-vakken	ook pijlen op aanvoertak	ook portaal aan begin voorsorteer-vakken
Standaard voorwegwijzer	-	-	-	2	-	0
Eenvoudige strookwisselwegwijzer	-	-	-	1	-	2
Complexe strookwisselwegwijzer	-	-	-	1	-	1
Tweestrooks toevoertak.						
leeftijdscategorie	Foute keuze rijstrook aanvoertak			Foute keuze voorsorteerstrook		
Vorm voorwegwijzer	alleen pijlen voorsorteer-vakken	ook pijlen op aanvoertak	ook portaal aan begin voorsorteer-vakken	alleen pijlen voorsorteer-vakken	ook pijlen op aanvoertak	ook portaal aan begin voorsorteer-vakken
Standaard voorwegwijzer	1	-	1	1	-	0
Strookwegwijzer turborotonde	6	1	0	0	1	2
Complexe strookwisselwegwijzer	3	2	2	3	2	2
totaal	10	3	3	4	3	4

Tabel H.4.3 Chi-kwadraattoets Poissonverdeling; keuze op aanvoertak in variant B3 versus de varianten B4 +B5

	Zonder wegdekpijlen	Met wegdekpijlen	Σ
Aantal waarnemingen (varianten)	1	2	3
Aantal foutmanoeuvres	6	1	7
Verwachtingswaarde	2,3	4,67	7
Chi-kwadraat =	8,6	# vrijheidsgraden	1
Kans onterecht verwerpen nulhypothese		Chidist p =	0,33%

Tabel H.4.4 Kruistabel met continuïteitscorrectie van Yates; keuze op aanvoertak in variant B3 versus de varianten B4 +B5

Contingency table	Zonder wegdekpijlen	met wegdekpijlen	Totalen
Aantal waarnemingen (varianten)	1	2	3
Aantal foutmanoeuvres	6	1	7
Totalen	7	3	10
Chi-kwadraat =	5,8	# vrijheidsgraden	1
Kans op onterecht verwerpen nulhypothese		Chidist p =	1,60%

Tabel H.4.5 Reactietijd keuze voorsorteevak bij verschillende voorwegwijzers, wegdekpijlen en portaalconfiguraties

Enkelstrooks toevoertak																		
	18-55 jaar						55+ jaar											
	alleen pijlen voorsorteer- vakken		ook portaal aan begin voorsorteer- vakken		samen		alleen pijlen voorsorteer- vakken		ook portaal aan begin voorsorteer- vakken		samen		alle leeftijden, samen					
Vorm voorwegwijzer	sec	#	sec	#	sec	#	sec	#	sec	#	sec	#	sec	#				
Standaard voorwegwijzer	1,98	21	2,00	21	1,99	42	1,77	21	2,03	21	1,90	42	1,95	84				
Eenvoudige strookwisselwegwijzer	1,76	21	1,62	21	1,69	42	1,91	21	2,06	21	1,99	42	1,84	84				
Complexe strookwisselwegwijzer	1,81	21	1,75	21	1,78	42	2,09	21	2,58	21	2,34	42	2,06	84				
p{H ₀ =kolomcellen gelijk}	74%		52%		38%		46%		19, %		10, %		36, %					
Tweestrooks toevoertak																		
	18-55 jaar								55+ jaar									
	alleen pijlen voorsorteer- vakken		ook pijlen op aanvoertak		ook portaal aan begin voorsorteer- vakken		samen		alleen pijlen voorsorteer- vakken		ook pijlen op aanvoertak		ook portaal aan begin voorsorteer- vakken		samen		alle leeftijden, samen	
Vorm voorwegwijzer	sec	#	sec	#	sec	#	sec	#	sec	#	sec	#	sec	#	sec	#	sec	#
Standaard voorwegwijzer	2,07	21		-	1,57	21	1,82	42	2,19	21		-	2,24	21	2,22	42	2,02	84
Strookwegwijzer turborotonde	1,66	21	1,50	21	1,74	21	1,63	63	2,17	21	2,56	21	2,34	21	2,36	63	2,00	126
Complexe strookwisselwegwijzer	2,00	21	1,83	21	2,13	21	1,99	63	2,15	21	2,37	21	2,41	21	2,31	63	2,15	126
p{H ₀ =kolomcellen gelijk}	46%		7%		65%		13%		99%		72%		94%		74%		47%	

De kleinste waarden voor de reactietijd zijn in het rood weergegeven.

Tabel H.4.6 Som reactietijd na zien voorwegwijzer en keuze voorsorteervak bij verschillende voorwegwijzers, wegdekpijlen en portaalconfiguraties

Enkelstrooks toevoertak									
	18-55 jaar			55+ jaar			alle leeftijden, samen		
Vorm voorwegwijzer	alleen pijlen voorsorteer- vakken	ook portaal aan begin voorsorteer- vakken	samen	alleen pijlen voorsorteer- vakken	ook portaal aan begin voorsorteer- vakken	samen			
Standaard voorwegwijzer	4,80	4,25	4,53	5,35	5,14	5,25	4,89		
Eenvoudige strookwisselwegwijzer	4,11	4,09	4,10	5,08	5,22	5,15	4,63		
Complexe strookwisselwegwijzer	4,15	4,09	4,12	5,38	5,58	5,48	4,80		
Tweestrooks toevoertak									
	18-55 jaar				55+ jaar			alle leeftijden, samen	
Vorm voorwegwijzer	alleen pijlen voorsorteer- vakken	ook pijlen op aanvoertak	ook portaal aan begin voorsorteer- vakken	samen	alleen pijlen voorsorteer- vakken	ook pijlen op aanvoertak	ook portaal aan begin voorsorteer- vakken		samen
Standaard voorwegwijzer	4,80		4,01	4,41	5,84		5,75	5,80	5,10
Strookwegwijzer turborotonde	4,33	3,84	4,73	4,30	6,48	6,22	5,80	6,17	5,23
Complexe strookwisselwegwijzer	4,15	4,09	5,04	4,43	6,31	6,19	6,28	6,26	5,34

H.5. Afsluitende opmerkingen

Een aantal zaken valt in dit onderzoek op.

- De gemeten reactietijden zijn zeer klein in vergelijking met de waarden die in andere onderzoeken worden gevonden (bijvoorbeeld Martens, 2001). Hiervoor zijn twee mogelijke oorzaken aan te wijzen. Allereerst de methode van werken met een touch screen. Niet uitgesloten moet worden, dat het aanraken van de te kiezen rijstrook zo dicht bij een intuïtieve manier van reageren ligt, dat dit een verkorting van de reactietijd oplevert.
Daarnaast moet niet worden uitgesloten dat het aanbieden van steeds dezelfde configuratie bij het nulpunt bij de respondenten tot een zekere routine heeft geleid in het herkennen van de situatie. Met als gevolg een bekorting van de reactietijd, vergelijkbaar met die van ter plekke bekende bestuurders. Een nadere analyse van dit aspect valt echter buiten de scope van deze studie.
- In een aantal gevallen laat de situatie waarin een portaal met besliswegwijzers aan het begin van de voorsorteerstroken aanwezig is een grotere reactietijd zien dan in de situatie zonder portaal. Allereerst is het mogelijk dat dit verband houdt met het feit dat de situatie door de hogere positie van de camera (net iets onder de wegwijzerborden!) zo overzichtelijk is, dat een portaal met wegwijzers nauwelijks informatie toevoegt. Maar vermoedelijk is dat niet de enige reden. Ook in andere onderzoeken treedt het verschijnsel op, dat de combinatie van pijlmarkering en besliswegwijzers niet tot verbetering leidt. In het onderzoek *Rotondepijlen op voorsorteervakken: een begripelijkheidsstudie* (Martens, 2001) werd zelfs geconcludeerd: “In deze conditie (aanwezigheid van een bermwegwijzer ter plaatse van het voorsorteervak) is het niet zinvol pijlmarkering op het wegdek aan te brengen, aangezien dit niet leidt tot het maken van betere keuzes, ofwel de begripelijkheid van de situatie niet wordt verhoogd”.
Deze bevinding heeft ertoe geleid, dat in de *Richtlijnen voor de bebakening en markering van wegen* (CROW, 2005) de aanbeveling is opgenomen om bij wegwijzers in de berm geen pijlmarkering aan te brengen bij nadering van een turborotonde. Afgezien van de juridische problemen die deze aanbeveling oplevert m.b.t. RVV-artikel 78 – in verband met de verplichting om de rijstroken te blijven volgen in de richting die door de wegdekpijlen worden aangegeven, (Fortuijn en De Bosch Kemper, 2006) –, bereikten de wegbeheerder van de turborotonde N218/Seggelant te Den Briel (waar deze aanbeveling werd opgevolgd) zoveel klachten over de afwezigheid van de wegdekpijlen, dat bij volgende projecten deze pijlen weer wel werden toegepast.

Maar ook in *Drivers' Evaluation of the Diverging Diamond Interchange*⁵⁶ (FHWA, 2007) wordt melding gemaakt van de bevinding, dat een mogelijk toegevoegde waarde van redundante voorzieningen (zoals anti-spookrijpijlen) niet kon worden aangetoond. Een mogelijke verklaring voor de discrepantie tussen de resultaten van laboratorium-experimenten en praktijkervaringen zou kunnen zijn, dat in een praktijksituatie de concentratie op de routekeuze kleiner is. Immers andere verkeersdeelnemers zijn een bron van afleiding met een verhoging van stress. In de praktijk zal daardoor de behoefte aan redundantie groter zijn, dan in laboratoriumsituaties wordt gemeten.

- Met de thans beschikbare gegevens is er geen aanleiding om de keuze van de werkgroep van het Platform Bewegwijzering opnieuw te herzien. Maar een meer professioneel opgezet onderzoek blijft gewenst. Met name de eenvormigheid van de situatie ter plekke van het nulpunt, de ooghoogte van de 'bestuurder', de mogelijke invloed van het leereffect en het mogelijke verschil in moeilijkheidsgraad in de keuze van rechts afslaan, rechtdoor gaan en linksaf slaan zijn punten van nadere aandacht, nog afgezien van het benodigde aantal respondenten.

⁵⁶ Deze evaluatie is uitgevoerd met een rijsimulator, waarin de betreffende deelnemer niet wordt geconfronteerd met ander verkeer.

Bijlage I. Ervaringen en belevingen van gebruikers

I.1. Enquêteformulier Coldenhove

Enquête Rotonde Coldenhove A20 / N220 te Maasland

In mei 1999 is bij Coldenhove een rotonde met een bijzondere vorm aangelegd.

De provincie wil graag weten wat u als weggebruiker van deze oplossing vindt.

Zowel de verkeersveiligheid als de verkeersafwikkeling vroegen om een verbetering van de situatie.

In plaats van een oplossing met traditionele verkeerslichten, is gekozen voor een oplossing in de vorm van rotondes. Dit vanwege de voordelen voor de veiligheid en een vlotte verkeersafwikkeling. Een oplossing met enkelstrooksrotondes zou in capaciteit te kort schieten, terwijl dubbelstrooksrotondes het bezwaar van vervelende snij-manoeuvres hebben.

Daarom is een alternatief ontwikkeld met een aparte vorm met:

- a. plaatselijk meer rijstroken;*
- b. een logische tracering van de rijstroken;*
- c. de toepassing van rijstrookscheidingen;*
- d. de toepassing van nieuwe rotonde-pijlmarkering;*
- e. een duidelijke bewegwijzering.*

De resultaten van deze enquête zullen worden betrokken bij verdere studie.

Bij voorbaat danken wij u voor uw medewerking.

Vragen:

1. Met welk voertuig rijdt u?
 - ☐ motor
 - ☐ personenauto of bestelauto
 - ☐ vrachtwagen
 - ☐ vrachtwagen met oplegger
 - ☐ vrachtwagen met aanhanger
2. Vindt u de nieuwe situatie duidelijk?
 - ☐ zeer duidelijk
 - ☐ duidelijk
 - ☐ soms aarzel ik
 - ☐ verwarrend
3. Vindt u het knooppunt?
 - ☐ prettig te berijden
 - ☐ matig te berijden
 - ☐ moeilijk te berijden
4. Wat vindt u van de wegwijzers?
 - ☐ duidelijk
 - ☐ onduidelijk
5. Hoe vaak komt u hier langs?
 - ☐ maal per week
 - ☐ maal per maand
 - ☐ zelden
6. Toelichting op de antwoorden en overige opmerkingen
(zonedig met pijlen aan te geven op figuur op de andere zijde)

.....
.....
.....
.....

Uw antwoord voor 15 september 1999 sturen naar:

(met bijgevoegde retourenvelop; postzegel is niet nodig)

Provincie Zuid-Holland

Bureau Verkeer Kamer B541

Antwoordnummer 100

2509 WB Den Haag

of inzending per fax 070 4417825

I.2. Tabellen enquête Coldenhove

Tabel I.2.1 Oordeel over duidelijkheid versus frequentie

Frequentie	< 1 x per week		≥ 1 x per week		totaal	
	#	%	#	%	#	%
Duidelijkheid						
zeer duidelijk	6	20%	83	20%	89	20%
duidelijk	13	43%	242	58%	255	57%
soms aarzel ik	8	27%	61	15%	69	15%
verwarrend	3	10,0%	34	8,1%	37	8,2%
Totaal	30	100%	420	100%	450	100%

Tabel I.2.2 Oordeel over duidelijkheid versus voertuiggebruik

Voertuig	motor		pers-auto		vrachtw.		trekker+ oplegg		bus		vw+aanh		meer voertgn	Totaal
	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%
Duidelijkheid														
zeer duidelijk	1	8%	67	20%	3	15%	9	32%	3	25%	1	7%	5	23%
duidelijk	10	77%	182	53%	13	65%	18	64%	8	67%	10	71%	14	64%
soms aarzel ik	2	15%	63	18%	1	5%		0%	1	8%		0%	2	9%
verwarrend		0%	29	9%	3	15%	1	4%		0%	3	21%	1	5%
Totaal	13	100%	341	100%	20	100%	28	100%	12	100%	14	100%	22	100%

Tabel I.2.3 Oordeel over berijdbaarheid versus frequentie

Frequentie	< 1 x per week		≥ 1 x per week		totaal	
	#	%	#	%	#	%
Berijdbaarheid						
prettig	19	63%	308	73,3%	327	72,7%
matig	10	33%	93	22,1%	103	22,9%
moeilijk	1	3%	19	4,5%	20	4,4%
Totaal	30	100%	420	100,0%	450	100,0%

Tabel I.2.4 Oordeel over berijdbaarheid versus voertuiggebruik

Voertuig	motor		pers-auto		vrachtw.		trekker+ oplegg		bus		vw+aanh		meer voertgn	Totaal
	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%
Berijdbaarheid														
prettig	12	85%	247	67%	17	57%	16	57%	8	67%	8	57%	18	82%
matig		10%	80	33%	2	29%	10	36%	4	33%	4	29%	3	14%
moeilijk	1	5%	14	0%	1	14%	2	7%		0%	2	14%		0%
blanco													1	
Totaal	13	100%	341	100%	20	100%	28	100%	12	100%	14	100%	22	100%

Tabel I.2.5 Oordeel over wegwijzers versus frequentie

Frequentie	< 1 x per week		≥ 1 x per week		totaal	
	#	%	#	%	#	%
Wegwijzers						
duidelijk	4	13,3%	63	15,0%	67	14,9%
onduidelijk	26	86,7%	357	85,0%	383	85,1%
Totaal	30	100,0%	420	100,0%	450	100,0%

Tabel I.2.6 Oordeel over wegwijzers versus voertuiggebruik

Voertuig	motor		pers-auto		vrachtw.		trekker+ oplegg.		bus		vw+aanh		meer voertgn	Totaal
	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%
Wegwijzers														
duidelijk	13	100%	283	83%	27	135%	17	61%	10	83%	13	93%	20	91%
onduidelijk		0%	58	17%	1	5%	3	11%	2	17%	1	7%	2	9%
Totaal	13	100%	341	100%	28	140%	20	71%	12	100%	14	100%	22	100%

I.3. Enqueteformulier geregeld turboplein Doenkadeplein

Bron: Horst, A.R.A. van der, M.C.L. Goenewoud, en M.H. Martens, E.C.J. Franx (2008) *Evaluatie geregelde turbopleinen*, TNO-rapport TNO-DV 2008 C006, TNO, Soesterberg.

ONGERUBRICEERD | TNO-rapport |

92 / 99

Bijlage C: Enquête geregeld turboplein Doenkadeplein



provincie **HOLLAND**
ZUID

Locatie:

Datum:

Tijd:

Inleiding

In samenwerking met de Provincie Zuid-Holland evalueren wij momenteel het Doenkadeplein (kruising N209-N471, de weg Zestienhoven – Bergschenhoek met de weg Kotterdam – Berkel en Rodenrijs). Het Doenkadeplein is een nieuw kruispunt dat is uitgevoerd in de vorm van een zogenaamd 'turboplein'. We willen graag inzicht krijgen in de beleving en ervaring van weggebruikers. Daarom aan u de vraag of we u een aantal vragen zouden mogen stellen. Het zou ons enorm helpen. Het zal ongeveer 5 minuten duren.

Alvast hartelijk bedankt voor uw medewerking!

TNO Human Factors
Soesterberg

ONGERUBRICEERD

ONGERUBRICEERD | INO-rapport |

93 / 99

VRAGEN M.B.T. DE TURBOPLEINEN

1) Hoe vaak maakt u gemiddeld gebruik van het Doerkadeplein?

- ☐ Incidenteel
☐ Enkele keren per maand
☐ Enkele keren per week
☐ (Bijna) dagelijks

2) Wanneer u gebruik maakt van dit turboplein, doet u dat dan voornamelijk in de spits, overdag of 's avonds/'s nachts? *(meerdere antwoorden mogelijk)*

- ☐ In de spits (= tussen 07:00 en 09:00 uur of 16:00 en 18:00 uur)
☐ Overdag (ongeveer tussen 09:00 en 16:00 uur)
☐ 's Avonds en 's nachts (ongeveer tussen 18:00 en 07:00 uur)

3) In hoeverre varieert uw routelozen op het plein?

- ☐ Niet (altijd dezelfde route)
☐ Soms (meestal dezelfde route, af en toe anders)
☐ Wisselend (steeds andere routes op het plein)

4) Duidelijkheid plein

a) In hoeverre vindt u de volgende aspecten van het plein duidelijk?
 Hiermee wordt bedoeld of het duidelijk wordt wat u moet doen.

Bewegwijzering	Voorsorteren	Te volgen route	Voorrangssituatie	
☐	☐	☐	☐	Heel duidelijk
☐	☐	☐	☐	Duidelijk
☐	☐	☐	☐	Niet duidelijk, niet onduidelijk
☐	☐	☐	☐	Onduidelijk
☐	☐	☐	☐	Heel onduidelijk

ONGERUBRICEERD

b) Kunt u uw antwoord op vraag 4) a) toelichten? Wat is er (on)duidelijk?

BEWEGWIJZERING:

VOORSORTEREN (rijstroken VOOR het plein):

TE VOLGEN ROUTE OP HET PLEIN ZELF (evt. uitgesplitst in LA, RD en RA):

VOORRANGSSITUATIE (ander verkeer):

5) Overzichtelijkheid plein

a) In hoeverre vindt u de volgende aspecten van het plein overzichtelijk?
Hiermee wordt bedoeld of datgene wat u tegenkomt aansluit bij wat u had verwacht.

Voorsorteren (VOOR het plein)	Te volgen route (OP het plein)	
☐	☐	Heel overzichtelijk
☐	☐	Overzichtelijk
☐	☐	Niet overzichtelijk, niet onoverzichtelijk
☐	☐	Onoverzichtelijk
☐	☐	Heel onoverzichtelijk

b) Kunt u uw antwoord op vraag 5) a) toelichten? Wat is er (on)overzichtelijk?

VOORSORTEREN (rijstroken VOOR het plein):

ONGERUBRICEERD | TNO-rapport |

95 / 99

TE VOLGEN ROUTE OP HET FLEIN ZELF (evt. uitgesplitst in LA, RD en RA):

6) Nachtelijk gebruik

a) Hebt u wel eens 's nachts gebruik gemaakt van het plein?

- ☐ Ja
☐ Nee (ga door naar vraag 7)

b) In hoeverre vindt u het plein 's avonds/'s nachts duidelijk in vergelijking met de dagsituatie? Denk hierbij opnieuw aan de bebording en belijning op en rond de weg; is het duidelijk wat er van u verwacht wordt?

- ☐ Veel duidelijker
☐ Duidelijker
☐ Niet duidelijker, niet onduidelijker
☐ Onduidelijker
☐ Veel onduidelijker

c) Kunt u uw antwoord op vraag 6) b) toelichten? Wat is er (on)duidelijker?

d) In hoeverre vindt u het plein 's avonds/'s nachts overzichtelijk in vergelijking met de dagsituatie? Denk hierbij opnieuw ook aan het overige verkeer op het turboplein.

- ☐ Veel overzichtelijker
☐ Overzichtelijker
☐ Niet overzichtelijker, niet onoverzichtelijker
☐ Onoverzichtelijker
☐ Veel onoverzichtelijker

ONGERUBRICEERD

b) Kunt u aangeven wat voor soort vergissingen dit zijn?

10) Oude situatie

a) Kent u de oude situatie van het plein?

- ☐ Ja
- ☐ Nee (ga door naar vraag 11)

b) In hoeverre vindt u het plein een verbetering ten opzichte van de oude situatie?

- ☐ Grote verbetering
- ☐ Lichte verbetering
- ☐ Geen verschil
- ☐ Lichte verslechtering
- ☐ Grote verslechtering

c) Kunt u uw antwoord bij vraag 10) b) toelichten; wat is er beter, wat is er slechter?

11) Wat vindt u de grootste voor- en nadelen van een turboplein?

VOORDELEN:

NADELEN:

ONGERUBRICEERD | TNO-rapport |

98 / 99

DEMOGRAFISCHE VRAGEN**NB: CURSIEVE VRAGEN (16 – 18) NIET STELLEN, MAAR ZELF INVULLEN (SCHATTEN)!****12) Wat is uw woonplaats?****13) Hoeveel jaar bent u in het bezit van uw rijbewijs?**

- ☐ Minder dan 2 jaar
- ☐ 2 tot 5 jaar
- ☐ 5 tot 10 jaar
- ☐ Meer dan 10 jaar

14) Hoeveel kilometer rijdt u gemiddeld per jaar?

- ☐ Minder dan 5.000 kilometer (weinig)
- ☐ 5.000 tot 15.000 kilometer (gemiddeld)
- ☐ Meer dan 15.000 kilometer (veel)

15) Waren dat voornamelijk kilometers voor:

- ☐ Woon – werkverkeer
- ☐ Zakelijk
- ☐ Privé
- ☐ (Combinatie)

16) Leeftijd

- ☐ 18 – 30
- ☐ 30 – 50
- ☐ Ouder dan 50

17) Geslacht

- ☐ Vrouw
- ☐ Man

ONGERUBRICEERD

18) Soort auto

- ☐ *Personenauto*
- ☐ *SUV/MPV*
- ☐ *Busje/Van*
- ☐ *Vrachtwagen*
- ☐ *Vrachtwagen met oplegger*
- ☐ *Vrachtwagen met aanhanger*
- ☐ *Motor*

19) Dit was de laatste vraag. Hebt u nog opmerkingen of suggesties naar aanleiding van dit onderzoek over het turboplein?

Toeslot: Hartelijk bedankt voor uw medewerking! De gegevens zullen anoniem verwerkt worden en gebruikt worden om te bepalen op welke manier de provincie Zuid-Holland pleinen als het Doenkadeplein toepast.