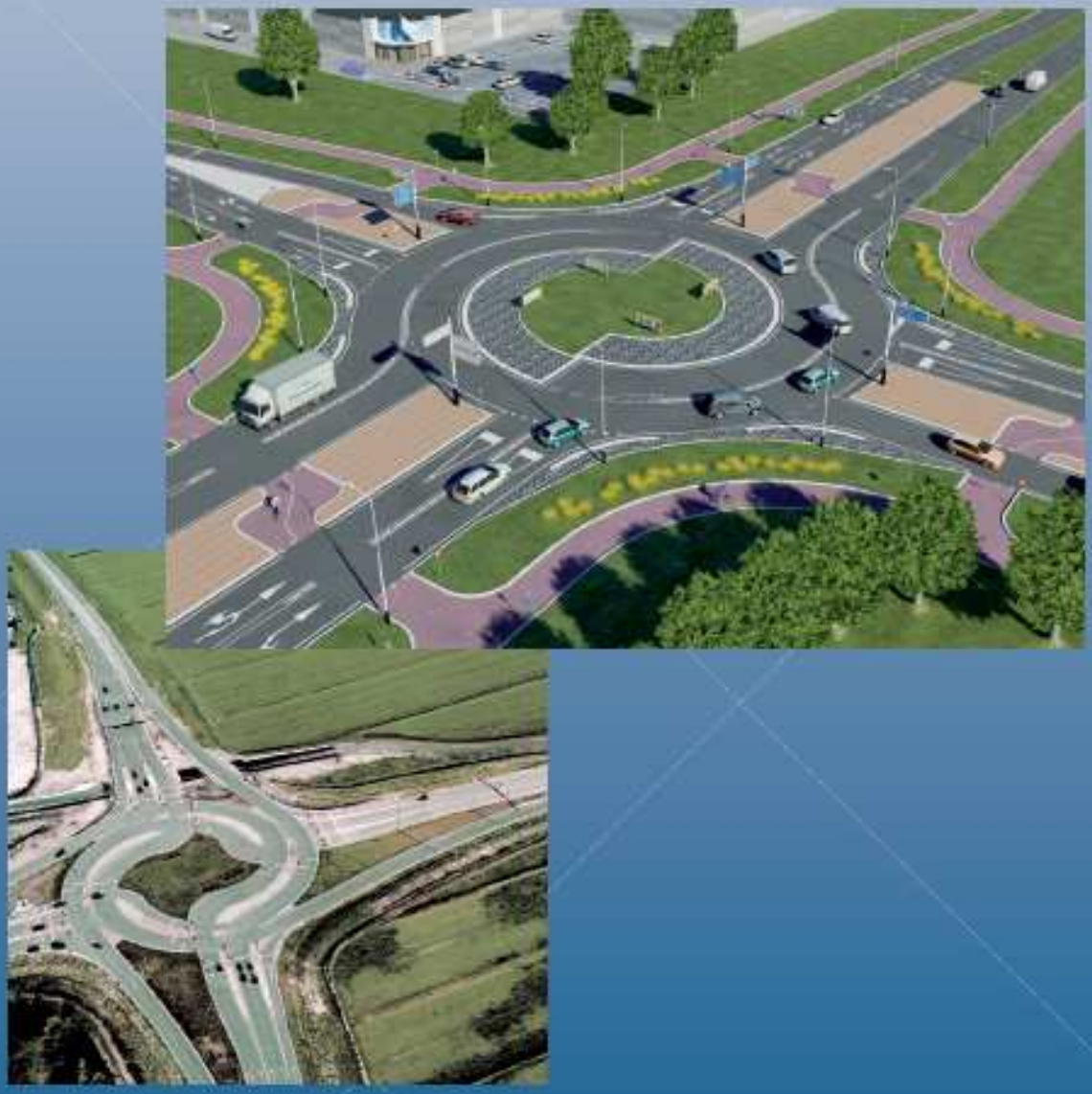
THESIS SERIES T 2013/1

L.G.H. (Bertus) Fortuijn Turborotonde en turboplein

TRAIL THESIS SERIES

L.G.H. (Bertus) Fortuijn



Turborotonde en turboplein:

ontwerp, capaciteit en veiligheid

TRAIL

Over de inhoud

Dit proefschrift is een combinatie van design en science. Behalve op ontwerpprincipes werpt het ook licht op de geschiedenis en de achtergrond van de (turbo)rotonde en het turboplein. De spiraalvorm en de overrijdbaar verhoogde rijstrookscheiding zijn essentieel voor de capaciteit en veiligheid van de turborotonde.
Het turboplein met radiaal aansluitende aanvoertakken, tangentiële afvoertakken, richtingspecifieke rijstroken en nieuwe voorwegwijzers verhoogt de capaciteit en verkort de cyclustijd in vergelijking met een viertakskruispunt.

Over de auteur

Bertus Fortuijn heeft zich met veel takken van het vak bezig gehouden. Na de prognostiek volgden verkeersveiligheid, doelgroepenverkeer en ten slotte verkeerstechnische vormgeving. Het meest bekend is hij vanwege de turborotonde, waarvan er een in Reeuwijk de naam ir. L.G.H. Fortuijnrotonde draagt.

TRAIL Research School ISBN 978-90-5584-157-8

Stellingen

behorende bij het proefschrift

Turborotonde en turboplein: ontwerp, capaciteit en veiligheid

L.G.H. (Bertus) Fortuijn, 8 januari 2013

1 De enkelstrooksrotonde biedt een vlotte verkeersafwikkeling bij een hoge veiligheid op een relatief klein oppervlak. De lage conflictsnelheid is daarvoor essentieel (hoofdstuk 2 van dit proefschrift).

2 De turborotonde dankt – evenals de enkelstrooksrotonde – zijn hoge veiligheidsniveau aan een strikte toepassing van de principes van Duurzaam Veilig (hoofdstuk 3 van dit proefschrift).

3 Adequate informatie over het voorsorteren via bewegwijzering en markering is essentieel voor het goed functioneren van turborotondes, zoals dat het geval is voor autosnelwegen (hoofdstuk 3 van dit proefschrift).

4 Een uitgebogen fietspad met fietsers uit de voorrang is een veilige oplossing. Toepassing daarvan ook bij rotondes binnen de bebouwde kom dient het – basale – welzijn van de fietser (hoofdstuk 6 van dit proefschrift).

5 Het uitwisselen van ervaringen op het gebied van de ontwerppraktijk is pas maatschappelijk relevante kennisdeling, als ook de effecten van het ontwerp daarbij betrokken worden.

6 Veel maatregelen ter bevordering van de verkeersdoorstroming impliceren een vrijheidsbeperking van de verkeersdeelnemer. In managementtermen wordt een analoog verschijnsel –via protocollen– ook wel professionalisering genoemd.

7 De kans op een onjuist gebruik van de stelling: *'Wetenschappelijke kennis is niet het eind van alle tegenspraak'*, buiten de wetenschap is groter dan die op het juiste gebruik.

8 De postmoderne overtuiging dat er geen absolute waarheid is, kan worden beschouwd als een gevolg van de moderne overschatting van het menselijk denkvermogen.

9 De uitspraak van Anselmus (1033- 1109): *"Ik begeer niet te kennen om te geloven, maar geloof om te kennen"*, laat meer ruimte over aan het mysterie in het geloof, dan de teneur van zijn meest bekende werk *'Waarom God mens werd'* doet vermoeden.

10 In de behandeling van een burn-out die samenhangt met een perfectionistische levenshouding, is het leren relativeren een belangrijk onderdeel van de psychotherapie. Het gebed in psalm 39 om inzicht in eigen vergankelijkheid kan worden beschouwd als een radicale vorm van het kunnen relativeren van de dingen waar men in zijn leven ten onrechte houvast aan ontleent.

11 Fundamentalistische christenen die geweld (willen) gebruiken ter verbreiding van het christelijk geloof zijn niet fundamentalistisch in de letterlijke zin van het woord.

Deze stellingen worden opponeerbaar en verdedigbaar geacht en zijn als zodanig goedgekeurd door de promotoren prof. Dr.-Ing. I.A. Hansen en prof. dr. ir. S.P. Hoogendoorn..

Propositions

going together with the Ph D thesis

Turbo Roundabout and Turbo Circle; Design, Capacity and Safety

L.G.H. (Bertus) Fortuijn, January 8th 2013

1 The single-lane roundabout enables smooth traffic flow with a high degree of safety on a relatively small surface area. The low conflict speed is essential for this (chapter 2 of this thesis).

2 The turbo roundabout, like the single-lane roundabout, attributes its high level of safety to strictly applied Sustainable Safety principles (chapter 3 of this thesis).

3 Adequate information about lane selection via signposting and road-marking is just as essential for the proper functioning of turbo roundabouts as it is for motorways (chapter 3 of this thesis).

4 A curved cycle path in which cyclists do not have right of way is a safe solution. The application of this at roundabouts within built-up areas should be to the fundamental benefit of the cyclist (chapter 6 of this thesis).

5 Sharing experiences of design practice is only a socially relevant form of knowledge sharing if also the effects of the design are considered.

6 Many measures that encourage traffic flow imply restricted freedom for the road user. In management terms an analogous phenomenon – via protocols – is also termed professionalization.

7 The chance of incorrect use of the proposition: *'Scientific knowledge is not the end of all argument'* outside the parameters of science is greater than the chance of correct use.

8 The post-modern conviction that there is no absolute truth can be considered a consequence of the modern overestimation of human intellect.

9 The statement by Anselmus (1033-1109): *"I do not seek to understand that I may believe, but I believe in order to understand"* allows more mystery to prevail in the belief than the tenor of his most famous work *'Why God became man'* would suggest.

10 In treating a burnout that is contiguous with a perfectionist lifestyle, learning to put things into perspective is a key component of psychotherapy. The prayer in psalm 39 to gain insight into one's own transience can be regarded as a radical form of being able to put into perspective those things by which one unjustly holds on to in life.

11 Fundamentalist Christians that use or want to use violence in the expansion of the Christian Faith are not fundamentalist in the literal sense of the word.

These propositions are considered opposable and defendable and as such have been approved by the supervisors prof. Dr.-Ing. I.A. Hansen en prof. dr. ir. S.P. Hoogendoorn.

Turborotonde en turboplein:
ontwerp, capaciteit en veiligheid

L.G.H. (Bertus) Fortuijn

Dit proefschrift is gebaseerd op een vinding van de auteur in 1996,
ruim 38 jaar werkervaring bij de provincie Zuid-Holland
en research bij de TU Delft in de periode 2003-2013.

TU Delft
Delft University of Technology

provincie ZUID HOLLAND

Motto: Veilig bereikbaar
Turbo Traffic Solutions

www.turbotrafficsolutions.nl
e-mail: Lgh@Fortuijn.com
mobiel: +31 6 202 805 39

Illustratie voorkant: Royal Haskoning en foto provincie Zuid-Holland, afkomstig uit Turborotondes, publicatie 257 van het CROW, kennisplatform voor infrastructuur, verkeer, vervoer en openbare ruimte te Ede

.

Turborotonde en turboplein:
ontwerp, capaciteit en veiligheid

Proefschrift

ter verkrijging van de graad van doctor
aan de Technische Universiteit Delft,
op gezag van de Rector Magnificus prof. ir. K.C.A.M. Luyben,
voorzitter van het College voor Promoties,
in het openbaar te verdedigen op dinsdag 8 januari 2013 om 15:00 uur
door
Lambertus Gerrit Hendrik FORTUIJN
civiel ingenieur
geboren te Hagestein

Dit proefschrift is goedgekeurd door de promotoren
Prof. Dr.-Ing. I.A. Hansen
Prof. dr.ir. S.P. Hoogendoorn

Samenstelling promotiecommissie:

Rector Magnificus	voorzitter
Prof. Dr.-Ing. I.A. Hansen	Technische Universiteit Delft, promotor
Prof. dr. ir. S.P. Hoogendoorn	Technische Universiteit Delft, promotor
Prof. dr. K.A. Brookhuis	Technische Universiteit Delft
Prof. P.G. Furth, Ph.D	Northeastern University
Prof. dr. ir. M.F.A.M. van Maarseveen	Universiteit Twente
Prof. dr. M.J. de Vries	Technische Universiteit Delft
Prof. ir. F.C.M. Wegman	Technische Universiteit Delft

TRAIL Thesis Series T2013/1, the Netherlands TRAIL Research School

TRAIL Research School
PO Box 5017
2600 GA Delft
The Netherlands
T: +31 (0) 15 278 6046
F: +31 (0) 15 278 4333
E: info@rsTRAIL.nl

ISBN: 978-90-5584-157-8

Copyright © 2012 by Lambertus G.H. Fortuijn

All rights reserved. No part of the material protect by this copyright notice may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without written permission from the author.

Printed in the Netherlands

Veilig bereikbaar

….de meeste is de liefde (vrij naar Paulus, 1 Korinthe 13:13)

Voorwoord

Waarom schrijft een mens een proefschrift? En meer in het bijzonder: waarom heb ik dit proefschrift geschreven?

De gebruikelijke gang van zaken is, dat iemand aan het begin van zijn carrière voor wetenschappelijke verdieping kiest en zo kennis maakt met het – vaak moeizame – aspect van het wetenschappelijke handwerk. Daar heb ik destijds niet voor gekozen. Allereerst rekende ik mij – niet ten onrechte – niet tot de wetenschappelijke uitblinkers. Weliswaar interesseerden mij de theoretische aspecten van het ingenieursvak, maar de meer praktische kant trok mij evenzeer aan. De combinatie van wetenschap en praktijk boeide mij het meest. De mogelijkheid zo werkzaam te zijn werd mij destijds in 1971 geboden bij de provincie Zuid-Holland. Die werkgever heb ik begin 2010 verlaten in verband met het bereiken van de pensioengerechtigde leeftijd. Maar wie tussen deze twee jaartallen een wat saaie werkperiode vermoedt, heeft het mis.

Zoals uit mijn curriculum vitae en persoonlijke publicatielijst valt op te maken, heb ik mij in de periode tot 1987 intensief beziggehouden met modellen voor het berekenen van toekomstige verkeers- en vervoersstromen. Sommige publicaties waren voor prof. dr. ir. Rudi Hamerslag aanleiding mij voor te stellen daarin verder te gaan door het schrijven van een proefschrift over de relatie tussen het zwaartekrachtsmodel[1] en bereikbaarheid. Gelet op de manier waarop destijds 'in de praktijk' aangekeken werd tegen het nut van promoveren, heb ik dat geen moment overwogen.

In 1987 werd ik voor een nieuwe uitdaging geplaatst: manager van het bureau Verkeer. Ik verkeerde toen in de veronderstelling dat het met het meer wetenschappelijke deel van mijn werk wel gedaan zou zijn. Aanvankelijk klopte dat ook: vijf jaar lang heb ik niets gepubliceerd. Onderdeel van het takenpakket van het bureau Verkeer betrof het veiligheidsaspect van het provinciale wegennet. Bij het voorbereiden van de *Nota*

[1] In tegenstelling tot wat deze term doet vermoeden, heeft een dergelijk model geen betrekking op de zwaartekracht, maar op de bestemmingskeuze van verkeersdeelnemers. De naam van het bedoelde modeltype is ontleend aan de overeenkomst die het enigermate vertoont met de zwaartekracht.

Verkeersveiligheid[2] bleek mij, dat met de set maatregelen[3] die ons toen ter beschikking stond, het niet mogelijk was op provinciale wegen de beleidsdoelstelling te halen: '25% minder verkeersslachtoffers in het jaar 2000 ten opzichte van 1985'. We hadden al wel enkele rotondes aangelegd, maar we beseften niet, dat we op veiligheidsgebied goud in handen hadden. Dat veranderde overigens binnen het jaar met de introductie van het concept Duurzaam Veilig, wat een motiverend perspectief bood. Toen de mogelijkheden daarvan goed tot ons doordrongen, kozen we als motto voor onze organisatorische eenheid: *'Veilig bereikbaar'*.

Naast het professionele aspect hiervan – het halen van doelstellingen vormt een uitdaging – speelde hierin ook een ethisch aspect een motiverende rol. Daarin ben ik overigens niet de enige. Een titel van een publicatie als *Vision Zero; An ethical approach to safety and mobility*[4] verraadt ook een dergelijke motivatie. Voor mij vormt de Bijbel de basis voor mijn ethische overtuiging. Dat is de achtergrond van de toevoeging *'..de meeste is de liefde'* [5] aan het motto van dit proefschrift.

Zoals in het vervolg van dit proefschrift aan de orde komt, was vanaf het begin duidelijk, dat de mogelijkheid om de moderne rotonde toe te passen beperkt was tot niet al te drukke kruispunten. Dat vormde de achtergrond van de probleemstelling verwoord in paragraaf 1.3. De uitdaging daarvan leidde tot de vondst van de turborotonde. Publicaties daarover vormden de aanleiding tot een tweede verzoek om een proefschrift te schrijven – nu van de kant van prof. Dr.-Ing. Ingo A. Hansen. Op dat verzoek kon pas worden ingegaan na een functiewijziging bij de provincie Zuid-Holland, die mij in staat stelde me meer op de inhoud van het vakgebied te richten. En dat op een leeftijd waarop anderen overwogen met de VUT[6] te gaan. De turborotonde combineert veiligheid met een goede verkeersafwikkeling. Met dit proefschrift wil ik een bijdrage leveren aan het *combineren van ontwerp en wetenschap.*

Na het voltooien van dit proefschrift wil ik een ieder danken die aan de totstandkoming ervan heeft bijgedragen. En dat zijn er meer dan ik kan opsommen. Maar voor enig houvast voor de lezer, wil ik een poging wagen. Als ingang daarvoor kies ik de volgorde in tijd. Allereerst de periode waarin ik heb gewerkt bij de provincie Zuid-Holland. Die dank geldt zowel mijn leidinggevenden als mijn collega's. De leidinggevenden hebben mij de ruimte geboden om beleidsdoelstellingen ook daadwerkelijk om te zetten in niet-conventionele maatregelen – voor een overheidsinstelling altijd een hachelijke onderneming. Maar ook wil ik mijn

---

2 Uitgebracht in juni 1991 door Gedeputeerde Staten van Zuid-Holland, Dienst Verkeer en Vervoer, Bureau Verkeer.

3 Onderverdeeld in drie speerpunten: snelheidshandhaving op 80 km/h-wegen, verhogen van de veiligheid van (brom)fietsverkeer en intensivering van de aanpak van black-spots. Bij het tweede punt werd opgemerkt: 'Dit zal overigens de nodige inspanningen vergen'. Maar ook dan leek de doelstelling niet haalbaar, dat als volgt werd verwoord: 'Voor het voeren van een integraal verkeersveiligheidsbeleid is het onvoldoende om zich te beperken tot een drietal speerpunten. Het beleid op genoemde speerpunten dient dan ook door flankerende maatregelen ondersteund te worden.'

4 Tingvall & Haworth (1999).

5 Een uitspraak van de apostel Paulus, waarin hij de liefde als van het grootste belang duidt in een vergelijking van drie belangrijke zaken: geloof, hoop en liefde.

6 VUT is de afkorting voor 'vervroegde uittreding', een regeling die werknemers de mogelijkheid bood om voor de oorspronkelijke pensioenleeftijd van 65 jaar te stoppen met werken.

collega's noemen, die met hun altijd kritische opmerkingen in niet onbelangrijke mate hebben bijgedragen aan het minimaliseren van fouten, die altijd bij het ontwikkelen van iets nieuws optreden. In de lijst van publicaties in de periode na 1987 zijn veel namen van hen als medeauteur terug te vinden. Speciale vermelding verdienen ir. Peter J. Carton en ir. A. Martijn de Leeuw.

Een belangrijk initiatief tot de totstandkoming van dit proefschrift heb ik hiervoor al vermeld: prof. Dr.-Ing. Ingo A. Hansen wil ik hartelijk danken voor het vertrouwen dat hij mij niet alleen bij de start maar ook in het vervolg heeft geschonken. Daarbij wil ik ook mijn tweede promotor, prof. dr. Serge P. Hoogendoorn betrekken, die mij heeft begeleid bij het tot een goed einde brengen van het onderdeel waarin de capaciteit van de turborotonde centraal staat. In dit verband wil ik tevens ir. Hein Botma noemen. Hij is mij zeer behulpzaam geweest, zowel bij het kennisnemen van de grondslagen van de hiaatacceptatie-theorie als bij het doordenken van statistische aspecten van veiligheidsonderzoek. Ten slotte wil ik ir. Aries S. van Beinum noemen, die niet alleen tijdens zijn afstuderen het computerwerk voor het schatten van het kritisch hiaat heeft uitgevoerd, maar ook later op basis van nieuwe data dit werk heeft verricht, waarbij hij zich inhoudelijk tot een echte counterpart ontwikkelde.

Ook wil ik zeker het thuisfront in mijn dank betrekken. Zonder de liefde en zorg van mijn vrouw Martine was het schrijven van dit proefschrift ondenkbaar geweest. Daarbij hebben zij en haar zus Mirjam de rol van corrector op zich genomen. Maar ook de support van mijn kinderen – inclusief het vervullen van de rol van paranimf – was voor mij een stimulans het werk na mijn pensionering af te maken, tussen de logeerpartijen van de kleinkinderen door. Bovenal wil ik mijn dankbaarheid tegenover God tot uitdrukking brengen, in het besef dat uiteindelijk Hij als mijn Schepper mij in staat heeft gesteld dit werk te doen.

Met een knipoog sluit ik af met een stelling die niet noodzakelijkerwijs geacht moet worden opponeerbaar en verdedigbaar te zijn: 'Voor iemand die op zijn achtenzestigste promoveert zijn de stellingen minstens zo belangrijk als het proefschrift zelf.'

Inhoud

Voorwoord **vii**

1 Inleiding **1**

1.1 Achtergrond 2
1.1.1 Historische verkeerspleinen 2
1.1.2 De ontstaansgeschiedenis van de moderne Nederlandse rotonde 7
1.1.3 Conclusies 14

1.2 Principe enkelstrooksrotonde 15

1.3 Aanleiding en probleemstelling 17

1.4 Doelstelling en onderzoeksvragen 18

1.5 Aanpak en wetenschappelijk bijdrage van de studie 19

1.6 Opbouw van dit proefschrift 20

2 Taxonomie van kruispunten en rotondes **21**

2.1 Kader voor een functionele indeling 22
2.1.1 Duurzaam Veilig-concept 22
2.1.2 Wegcategorieën 25

2.2 Functionele ordening van kruispunttypen 27
2.2.1 Stroomwegen onderling (A in Tabel 2.2.1) 27
2.2.2 Stroomweg met gebiedsontsluitingsweg (B in Tabel 2.2.1) 27
2.2.3 Gebiedsontsluitingswegen onderling (C in Tabel 2.2.1) 29
2.2.4 Gebiedsontsluitingsweg met erftoegangsweg (D in Tabel 2.2.1) 29

2.3 Kruispuntindeling naar vorm en regelgeving 29
2.3.1 Voorrangskruispunten in gebiedsontsluitingswegen (GOW's) 30
2.3.2 Verkeerslichten geregelde kruispunten met snelheidsremmende voorzieningen 31

2.3.3 Rotondes 32

2.4 Verschillende typen pleinen en rotondes 35
2.4.1 Indeling van pleinen en rotondes 35
2.4.2 Indelingen rotondes in Nederland 37
2.4.3 Indeling van de FHWA/TRB van pleinen en rotondes 38

2.5 Conclusies 41

3 Turborotonde 43

3.1 Achtergrond 44

3.2 Passeerbaanrotondes 45

3.3 Kenmerken turborotonde 46

3.4 Varianten turborotondes 50

3.5 Ontwerpelementen turborotondes 53
3.5.1 Afwijkende ontwerpelementen turborotondes 53
3.5.2 Turboblock 53
3.5.3 Invloed positionering translatie-as op snelheidsreductie en comfort 54
3.5.4 Overrijdbaar verhoogde strookscheidingen 55
3.5.5 Begin binnenste rotondestrook 59

3.6 Bewegwijzering en pijlmarkering voor turborotondes 61
3.6.1 Rotondepijlen op de aanvoerwegen 61
3.6.2 Bewegwijzering 63
3.6.3 Samenspel tussen bewegwijzering en pijlmarkering 64

3.7 Conclusies 65

4 Capaciteit turborotonde 67

4.1 Basisconcept rotondecapaciteit 68
4.1.1 Definitie van capaciteit 68
4.1.2 Verkeersprocessen op de moderne enkelstrooksrotonde 69
4.1.3 Verkeersprocessen op de turborotonde 71
4.1.4 Verschil tussen turborotonde en compacte concentrische tweestrooksrotonde 71
4.1.5 Resulterende veronderstellingen 73

4.2 Typen capaciteitsmodellen 73
4.2.1 Conflict-stroommodellen 73
4.2.2 Basisconcept hiaatacceptatie-modellen 75
4.2.3 Hiaatverdeling in de rotondestroom *f(t)* 76
4.2.4 Hiaatbenuttingsfuncties *g(t)* 79
4.2.5 Basisveronderstellingen hiaatacceptatie-modellen 80
4.2.6 Hiaatacceptatie-modellen 81
4.2.7 Gevoeligheidsanalyses hiaatacceptatie-modellen 85
4.2.8 Aanpassingen capaciteitsformules 88
4.2.9 Modelkeuze en modificaties 92

4.3 Onderzoeksopzet 93
4.3.1 Dataverzameling 94
4.3.2 Gebruik van de data 96
4.4 Kalibratie hiaatacceptatie-parameters 96
4.4.1 Minimum volgtijd t_M en clusteringconstante ρ 96
4.4.2 Kritisch hiaat 97
4.4.3 Oprijvolgtijd 100
4.4.4 Conclusies schatting kritisch hiaat en oprijvolgtijd uit hiaatmetingen 100
4.5 Kalibratie parameters capaciteitsmodel op stroomniveau 101
4.5.1 Schatting enkelstrooksrotonde op stroomniveau 101
4.5.2 Schatting linker toeritstrook hoofdtak turborotonde 103
4.5.3 Schatting linker toeritstrook zijtak turborotonde 104
4.5.4 Effect van verdeling verkeer over twee rotondestroken op de capaciteit van de linker toeritstrook zijtak 105
4.5.5 Capaciteit rechter toeritstroken hoofdtak en zijtak turborotonde 107
4.5.6 Vergelijking met concentrische tweestrooksrotondes 107
4.5.7 Effect van het elimineren van de invoegverstoring 108
4.6 Conclusies 109

5 Rotondes en pleinen met verkeerslichten 113

5.1 Rotondes en verkeerslichten 114
5.1.1 Mogelijkheden verkeerslichten op (kleine) rotondes 114
5.1.2 Verkeerslichtenregeling 114
5.1.3 Rotonde-doseerlichten 116
5.1.4 Onderzochte rotonde-doseerinstallaties 123
5.2 Traditioneel verkeersplein met verkeerslichten 124
5.2.1 Kenmerken traditioneel verkeersplein 124
5.2.2 Voorbeelden van variantoplossingen 127
5.2.3 Conclusies behandeling traditionele verkeerspleinen 128
5.3 Ontwerp turboplein 128
5.3.1 Ontwerpdoelstelling turboplein 128
5.3.2 Eerste stap ontwikkeling turboplein 129
5.3.3 Basisontwerp Turboplein 130
5.3.4 Doorrijsnelheid personenauto’s 131
5.4 Turboplein met brede verkeersgeleiders 131
5.5 Bebording en markering turboplein 133
5.5.1 Uitgangspunten bebording en markering turbopleinen 133
5.5.2 Verkeersborden en rijstrookmarkering op het plein 133
5.5.3 Pijlmarkering op het plein 135
5.5.4 Wegdekleds 136
5.5.5 Bewegwijzering en pijlmarkering op de voorsorteervakken 136
5.5.6 Bewegwijzering en pijlmarkering vóór de voorsorteervakken 138
5.5.7 Conclusies bebording en markering 140

5.6 Vergelijking met andere kruispuntoplossingen 141
5.6.1 Afwegingsaspecten 141
5.6.2 Verkeersafwikkeling 141
5.7 Conclusies 143
6 Veiligheid en beleving 145
6.1 Veiligheidsonderzoek algemeen 146
6.2 Invloed van rotonde-detaillering en fietsoplossing op de veiligheid 147
6.3 Correctiefactoren voor voor-en-nastudies 149
6.3.1 Effect verschil in gevaarzetting 149
6.3.2 Regressie naar het gemiddelde 151
6.3.3 Correctie voor algemene veiligheidsontwikkeling 152
6.4 Veiligheidseffect van aanleg turborotondes 152
6.4.1 Beschikbaar cijfermateriaal 152
6.4.2 Ongecorrigeerde resultaten 153
6.4.3 Gecombineerd effect van de algemene veiligheidsontwikkeling en regressie naar het gemiddelde 153
6.4.4 Vergelijking met Amerikaans onderzoek 154
6.5 Verkeersveiligheid turbopleinen 156
6.6 Belevingsonderzoek 157
6.6.1 Turbo-kluifrotonde 157
6.6.2 Turbopleinen 161
6.7 Conclusies 165
7 Samenvatting en conclusies 167
Summary 173
Literatuur 179
Overzicht bijlagen op CD-ROM 193
Curriculum vitae 195
Publicaties van de auteur 197
TRAIL Dissertatiereeks 201

1 Inleiding

In het wegennet spelen knooppunten en kruispunten een belangrijke rol. De capaciteit, verliestijd en veiligheid van niet-autosnelwegen worden in belangrijke mate bepaald door gelijkvloerse kruispunten. Daar wordt de verkeersafwikkeling belemmerd en het ongevalrisico verhoogd doordat de verkeersstromen van verschillende richtingen hetzelfde conflictvlak gebruiken. Op het wegennet in beheer bij de provincie Zuid-Holland was bijvoorbeeld het aantal slachtofferongevallen in de periode 1992-2002 bijna gelijk verdeeld over kruispunten en wegvakken, terwijl kruisingsvlakken een zeer beperkt deel van de weglengte beslaan (PZH, 1994-2003). Een poging om de doorstroming en veiligheid van deze essentiële onderdelen van het wegennet te verbeteren vormt de achtergrond van dit proefschrift.

Gebleken is dat enkelstrooksrotondes een belangrijke kwaliteitsverbetering kunnen bieden voor de verkeersafwikkeling en de verkeersveiligheid. De capaciteit van deze rotondes is echter beperkt. Anno 1996 was de maatschappelijke uitdaging een rotondeconcept te ontwikkelen, dat de veiligheidskenmerken van de enkelstrooksrotonde verenigt met de capaciteitsvoordelen van een meerstrooksrotonde. De auteur is die uitdaging aangegaan in het ontwikkelen van de turborotonde. In 2000 is de ontwikkeling van het turboplein daarop gevolgd.

In deze inleiding wordt allereerst de historische achtergrond van de moderne rotonde verkend. Teruggegaan wordt tot het ontstaan van het oude verkeerplein, omdat de moderne rotonde daarmee de hoofdvorm gemeenschappelijk heeft. Maar de moderne rotonde verschilt daarvan ook op belangrijke punten. Die leveren winst op zowel ten aanzien van de veiligheid als van de verkeersafwikkeling (paragraaf 1.2).

Met de introductie van de concentrische meerstrooksrotonde dreigden echter belangrijke verworvenheden van de enkelstrooksrotonde weer teloor te gaan. Dit vormde de aanleiding en probleemstelling die hebben geleid tot het onderwerp van dit proefschrift (paragraaf 1.3). In

paragraaf 1.4 worden de doelstelling en onderzoeksvragen van deze studie beschreven, die zowel gericht zijn op ontwerp als op de toetsing daarvan. Paragraaf 1.5 bevat de aanpak van deze studie, terwijl in paragraaf 1.6 de opbouw van dit proefschrift wordt toegelicht.

1.1 Achtergrond

Lang voordat de auto zijn intrede deed, waren er pleinen in steden en dorpen in Europa. Wanneer daarop een rondgaande verkeerscirculatie in één richting is ingesteld, worden ze als verkeersplein aangeduid. Daartoe beperkt zich deze studie. De ontwikkeling van het verkeersplein tot de moderne rotonde beslaat de periode van ruim de eerste helft van de 20e eeuw.

1.1.1 Historische verkeerspleinen

Vermoedelijk heeft Holroyd Smith als eerste in 1897 het concept van een verkeersplein voorgesteld aan de London County Council, waarbij hij het Ludgate Circus als mogelijk voorbeeld noemde[7] (Todd, 1991). Toch is het eerste verkeersplein niet in Engeland, maar waarschijnlijk[8] in de Verenigde Staten gerealiseerd: de Columbus Circle in New York staat te boek als het eerste plein waarop in 1905 verkeer in één richting is ingesteld (Figuur 1.1-1). Het voorstel daartoe werd in juni 1903 (Eno, 1929, p. 60, en 1939, p. 8) gedaan door William Phelps Eno (1858-1945), die wel de 'father of traffic control' wordt genoemd[9] (Todd, 1988).

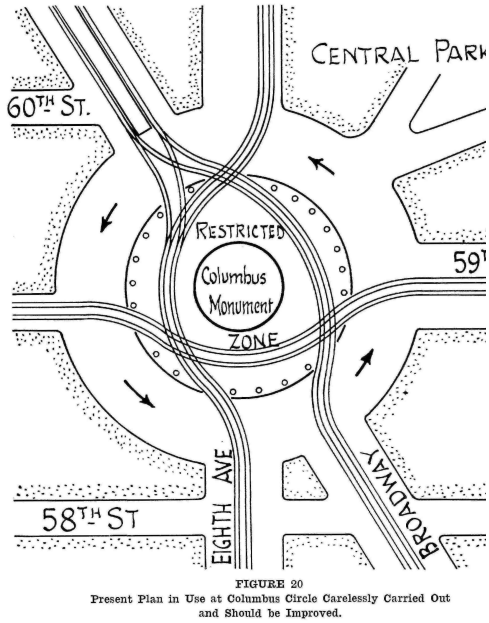
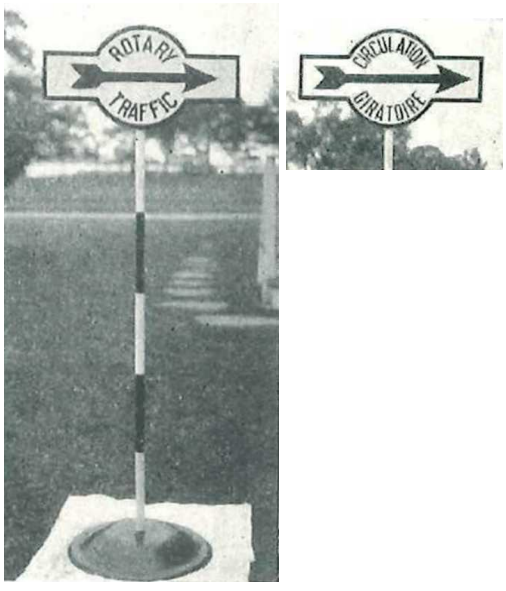


FIGURE 20
Present Plan in Use at Columbus Circle Carelessly Carried Out and Should be Improved.

Figuur 1.1-1 Tekening van Columbus Circle



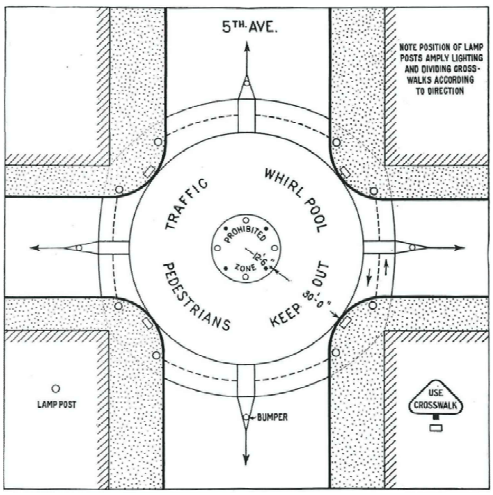
Figuur 1.1-2 Rotary Traffic Signs

[7] Thans is het Ludgate Circus een met verkeerslichten geregeld kruispunt, maar de bebouwing verraadt dat hier eerder een plein lag.

[8] Brown (1995, p.2) merkt op: "An even earlier implementation of Hénard's 'giratoire-boulevard' principle may be indicated by the proposals for major junctions in the reconstruction of Lisbon".

[9] Eno stelt bijvoorbeeld: "Traffic problems have now become too important to the people of all countries to leave them in future to be worked out by local police officers or engineers untrained in the *science of traffic management*", met het '*rotary system'* als een onderdeel daarvan (1929, p. 73).

In samenhang daarmee ontwikkelde hij een Rotary Traffic Sign, niet alleen voor New York, maar zelfs ook voor Parijs (zie Figuur 1.1-2). De interesse van Eno ging niet alleen uit naar grote verkeerspleinen (met vluchtheuvels in de zijtakken om het verkeer te kanaliseren en de oversteek van voetgangers te bekorten), maar ook ontwierp hij zeer kleine 'traffic circles' (Ø 26 m, Figuur 1.1-3[10]). De eerste is in 1915 gerealiseerd in Detroit[11].



Figuur 1.1-3 Een kleine rotonde ('verkeersdraaikolk') met voetgangersoversteekplaatsen

Behalve groot voorstander van het 'rotary system', was hij sinds 1929 ook een pleitbezorger voor 'links voorrang'[12]. Dat onderwerp plaatste hij in zijn boek uit 1929 praktisch vooraan (pp.14-16). Daarin laat hij met tekeningen zowel het verschil in de kans op blokkeren van het kruispunt als het verschil in uitzicht op de voertuigen die voorrang hebben, zien. Todd (1988, 1991) meldt dat dit idee door de autoriteiten niet is overgenomen, noch in Amerika (National Conference on Street and Highway Safety in 1930) noch in Engeland (Scotland Yard Londen in 1933).

In Europa werd de 'mouvement giratoire' voor het eerst in 1907 ingesteld, en wel op de twee meest bekende pleinen[13] van Parijs: Place de l' Étoile – thans Place Charles de Gaulle geheten, rond de Arc de Triomphe – en Place de la Nation[14], op voorstel van Eugène Hénard (1849-1923), stadsarchitect van Parijs. Figuur 1.1-4 toont het principe van de verkeersafwikkeling op een verkeersplein zoals Eugène Hénard (1906) zich dat voorstelde[15].

---

[10] Eno (1929) heeft zich veel inspanningen getroost om het idee ingang te doen vinden dat voetgangers niet via het kruisingsvlak zouden oversteken, maar via oversteekplaatsen op de aansluitende takken, voorzien van verkeerseilanden.

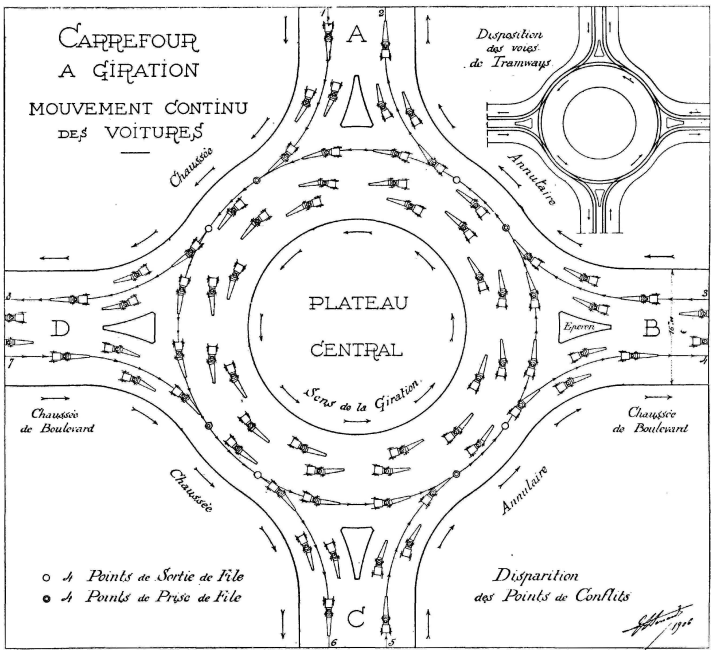
[11] Op het kruispunt Grand-view Avenue and Farmer Street met een diameter van 62½ feet (20 m), die door Eno echter te klein werd beoordeeld; bij 23 m of meer oordeelde hij pas dat een kruispunt voldoende ruimte bood voor een kleine rotonde (Eno 1929, p.166).

[12] In 1910 had Eno nog zijn medewerking verleend aan een verkeersbesluit voor Parijs, waarin de Franse regel 'voorrang voor verkeer van rechts' werd toegepast (Todd, 1988).

[13] Het eerste plein wordt genoemd door Eno (a.w., p. 60); Brown (1995, p. 2) noemt ook het tweede.

[14] Deze pleinen vormen het middelpunt van een ster van lanen in de negentiende-eeuwse stadsplanning van Georges-Eugène baron Haussmann (1809-1891).

[15] Zowel Figuur 1.1-4 als Figuur 1.1-5 zijn overgenomen uit '*Etudes sur les transformations de Paris'*, die de tekst bevat van publicaties van Eugène Hénard (uit de periode 1903-1909). Beide zijn voorzien van de handtekening van Hénard met het jaartal 1906. Wolf (1968, voetnoot op p. 56) wijst op een



Figuur 1.1-4 Principeschets van Eugène Hénard voor een 'mouvement giratoire'

Een aantal zaken valt in deze tekening van Hénard op:

- de continue voortgang (*MOUVEMENT CONTINU*) van de voertuigen is zijn uitgangspunt, d.w.z. het geheel is gebaseerd op het principe van samenvoegen en uitvoegen;
- hij vermeldt: *'Disparition des Points de Conflits'*, d.w.z. in zijn concept ziet Hénard geen conflictpunten[16]; m.a.w. de vier punten van samenvoeging (*Points de Prise de File*) benoemt hij niet als conflictpunt;
- hoewel hij verschillende rijtuigen naast elkaar tekent, accentueert hij slechts één verkeersstroom met invoeg- en uitvoegpunten; analyse van de weefbewegingen laat hij hier[17] buiten beschouwing.

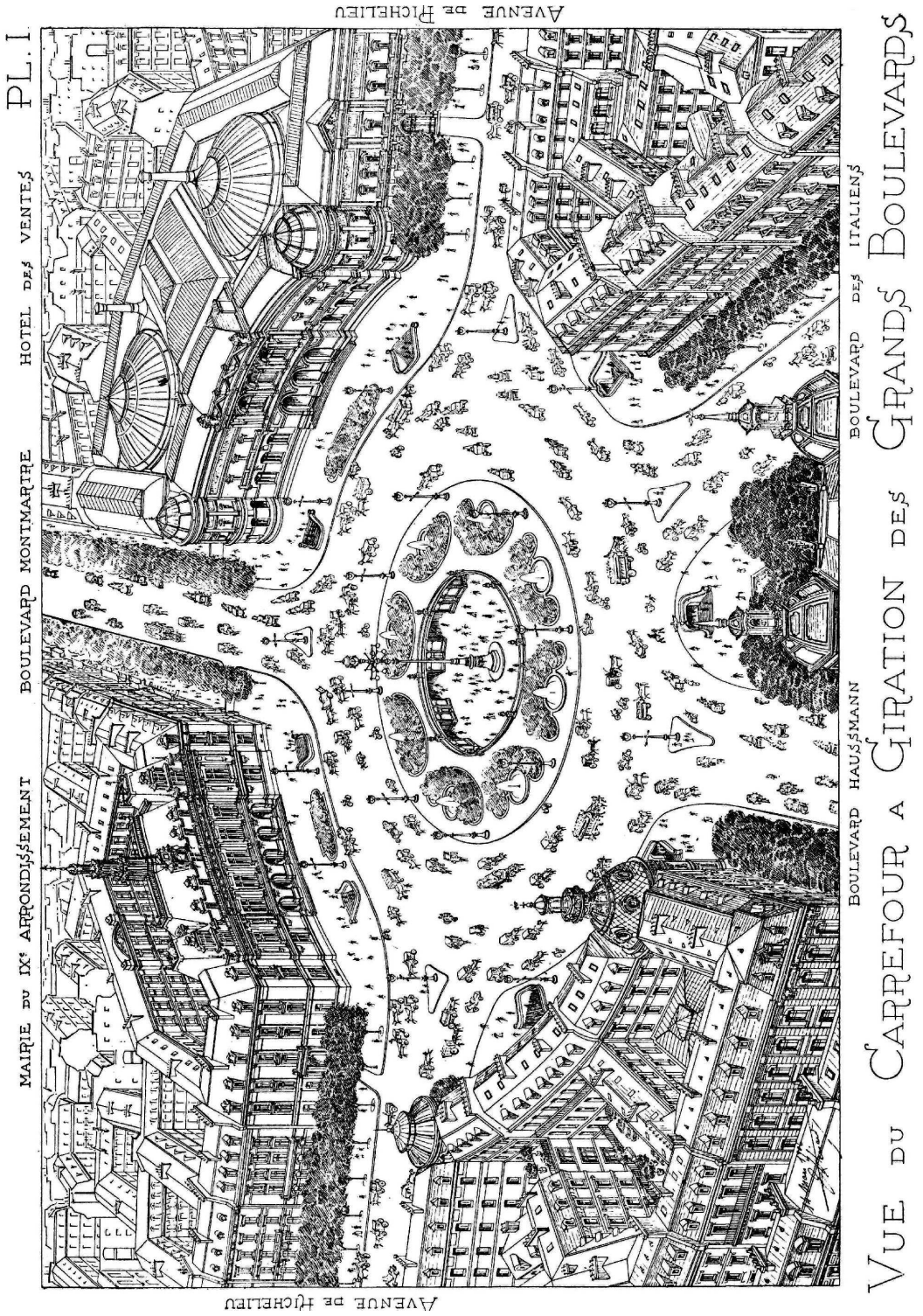
Figuur 1.1-5 is een bekende tekening van Hénard gedateerd 14 maart 1906[18].

---

publicatie van Eno in het Frans (*Le Problème de la circulation 'système Eno'; circulation à sens unique*, Paris 1912, 61) waarin Eno de mogelijkheid oppert, dat Hénard het idee voor een rotonde aan hem heeft ontleend. Maar Wolf ziet daarvoor geen enkel bewijs. Hoewel het idee van Eno eerder is gerealiseerd dan dat van Hénard, was Hénard eerder met de publicatie van zijn idee. (De eerste publicatie van Eno is: *Street Traffic regulation*, New York 1909). Ook Todd (1991, p. 143) concludeert, dat rond 1900 onafhankelijk van elkaar het idee voor een verkeersplein in Engeland, Frankrijk en Amerika is ontstaan. Er zijn overigens geen aanwijzingen dat Eno en Hénard elkaar ooit hebben ontmoet, althans in zijn publicatie *'The story of highway traffic control 1899-1939'* uit 1939 doet Eno daar geen verslag van. Wel schrijft Eno (1929, p. 60), dat het voorstel in Parijs voor Place de l'Étoile is gedaan in 1905 waarbij hij – op p.62 – verwijst naar 'Eugene Hennard, a noted French architect'.

[16] Op een viertakskruispunt onderscheidt hij eveneens vier uitvoegpunten en vier samenvoegpunten met daarbij zestien conflictpunten (zie Figuur 2.3-2).

[17] In het onderdeel 'Analyse du mouvement des voitures' beschouwt Hénard ontmoetingen tussen voertuigen onder verschillende hoeken. Daarin stelt hij, dat ontmoetingen van voertuigen parallel of onder een kleine hoek vlot zijn af te handelen, maar dat ontmoetingen onder een grotere hoek (tot 90^0) erg lastig zijn, tot opstoppingen en aanrijdingen leiden met oponthoud tot gevolg. Dat weven op een plein ook tot veel aanrijdingen leidt, heeft hij niet voorzien. Hetzelfde geldt trouwens voor Eno, die in zijn publicatie uit 1929 op pag. 65 een afbeelding van La Place de L'Étoile toont, voorzien van verkeersgeleiders (die niet zijn aangelegd) inclusief pijltjes van afslaande auto's, zonder het risico van mogelijke snijconflicten te noemen.



Figuur 1.1-5 Ontwerp verkeersplein voor 'Grand Boulevards' van Eugène Hénard

[18] Figuur 1.1-5 is een voorstel voor een verkeersplein op het ontmoetingspunt van Boulevard Haussmann / Boulevard des Italiens / Rue de Richelieu / Boulevard Montmartre / Rue Drouot te Parijs. Het verkeer bestaat merendeels uit rijtuigen met paarden ervoor, en een enkele auto, motorrijder en handkar. Hénard duidde zowel Rue de Richelieu als Rue Drouot (foutief) aan als Avenue de Richelieu (links op de tekening). Dit kruispunt is niet als plein gerealiseerd. De Boulevard Haussmann is pas in 1927 doorgetrokken tot de Rue Druout (bron: http://www.apophtegme.com/ROULE/haussmann.pdf, geraadpleegd 6-3-2012).

In Engeland werd één van de eerste rotondes in 1910 geopend in Letchworth Garden City, een prototype tuinstad halverwege Londen en Cambridge op een kruispunt van zes wegen. Hij draagt de naam Sollershott Circus. Het was een ontwerp dat Raymond Unwin publiceerde in zijn boek *Town Planning in Practice*, daartoe geïnspireerd door de voorbeelden uit Parijs (Todd, 1991). Toch duurde het tot 1926 voordat op pleinen in Londen éénrichtingscirculatie werd ingesteld[19]. In dat jaar werd door de Engelse minister van Transport – na een ingezonden brief in *The Times* – ook het woord 'roundabout' formeel gesanctioneerd als vervanger voor 'gyratory'. In de jaren daarna groeide het aantal rotondes in Engeland sterk.

Ook Nederland kent binnen zijn steden historische pleinen in allerlei vormen. Veelal hadden en hebben die een zodanige verblijfsfunctie dat de verkeersfunctie daaraan geheel ondergeschikt is. Maar ook komen oudere pleinen met een verkeersfunctie voor. Een voorbeeld van een stedelijk verkeersplein is het Hofplein in Rotterdam. Thans is dat voorzien van spiraalmarkering en verkeerslichten. Ook buiten de bebouwde kom kwamen grote verkeerspleinen voor. Bekende pleinen in het rijkswegennet waren het verkeersplein Oudenrijn (A2/A12) bij Utrecht, verkeersplein Deil (A2/A15) en verkeersplein Gorinchem (A27/A15). Ook waren er nabij Den Haag twee verkeerspleinen als aansluiting boven de autosnelweg: de verkeerspleinen Ypenburg (A4/A13) en Leidschendam (A4/A12). Deze zijn alle vervangen door grote autosnelwegknooppunten. Het laatstgenoemde verkeersknooppunt heet thans Prins Clausplein.

Het provinciale wegennet in Zuid-Holland[20] kende ook zijn verkeerspleinen: het Lammenschansplein te Leiden, Gouwsluisplein te Alphen aan den Rijn, het Stolwijkersluisplein te Gouda, het Capelseplein en het verkeersplein Westerlee, op de grens van een rijksweg en het provinciale wegennet te Naaldwijk. Een aantal kenmerkte zich door meer dan vier aansluitende takken (Gouwsluisplein en Westerlee). Drie van die vijf verkeerspleinen zijn begin jaren '70 vervangen door kruispunten met verkeerslichten, met als uitzonderingen: verkeersplein Stolwijkersluis te Gouda (in 2000 omgebouwd naar een turborotonde) en het Capelseplein te Capelle aan den IJssel (dit verkeersplein is van verkeerslichten voorzien).

Principe oud verkeersplein

De eerste Highway Capacity Manual (HCM, 1950) definieert: "*Traffic circle* – A rotary intersection having a central area circular or oval in shape of sufficient size to produce weaving maneuvers in lieu of direct crossings between the various movements"[21]. Conform het concept van Figuur 1.1-4, waren ook in Nederland de verkeerspleinen oorspronkelijk gebaseerd op twee uitgangspunten: de takken sloten tangentieel aan op het plein en de uitwisseling tussen de verschillende richtingen was gebaseerd op het uitvoeren van weefbewegingen. Met uitzondering van enkele verkeerspleinen (bijvoorbeeld in het oosten

[19] Todd (1989) meldt dat een bezoek van William Phelps Eno in juni 1924 aan Scotland Yard hiertoe een belangrijke stoot heeft gegeven. Zijn voorstel gedaan bij een bezoek in 1933 aan Scotland Yard om *offside priority* in te stellen werd echter niet overgenomen.

[20] Zie voetnoot nr. 61 op blz. 13.

[21] Sinds Eno en Hénard is het weef-concept voor de verkeersafwikkeling op pleinen een halve eeuw lang niet gewijzigd.

drie in Venlo, en één in Nijmegen[22] en in het westen een plein in Zaandam[23]), was de voorrang zo geregeld, dat het verkeer op het plein aan het verkeer van rechts voorrang moest verlenen.
Deze verkeerspleinen functioneerden evenwel niet goed. Door de voorrangsregeling zette het verkeer op de rotonde bij hoge intensiteiten zichzelf vast. Om voldoende opstelruimte te creëren was daarom een grote rotondestraal nodig. Deze was ook nodig om voldoende lengte te hebben voor het uitvoeren van de weefbewegingen. Het nadeel was echter dat daardoor weer met hogere snelheden gereden werd. Al met al kenmerkte dit rotondetype zich door veel ongevallen, waarbij de snij-ongevallen die samenhingen met het weven over een te kleine afstand, domineerden. Daarom zijn in de jaren zeventig deze verkeerspleinen op veel plaatsen vervangen door kruispunten die met verkeerslichten geregeld worden.

1.1.2 De ontstaansgeschiedenis van de moderne Nederlandse rotonde

Engeland kan worden beschouwd als de bakermat van de moderne rotonde. In de ontstaansgeschiedenis van de Nederlandse enkelstrooksrotonde spelen echter niet alleen Engeland, maar ook Duitsland en Frankrijk een rol. Daarbij is de Nederlandse enkelstrooksrotonde geen kopie van de Engelse rotonde. De Nederlandse rotonde wijkt namelijk niet alleen qua voorrangsregeling af van het oude verkeersplein, maar ook in de wijze waarop zowel de aanvoer- als de afvoertakken aansluiten en de introductie van het ‘tweetraps eiland’, bedacht door Kars Erné (1932-2010)[24].

De voorrangsregeling

Brilon en Vandehey (1998) melden, dat in Duitsland sinds de jaren 1930 verkeerspleinen op zowel knooppunten van het hoofdwegennet als in stedelijk gebied voorkwamen. Daar gold de algemene regel dat het pleinverkeer voorrang heeft op het verkeer vanaf de aanvoertakken. Dat werd geregeld met het rotondebord[25].



Figuur 1.1-6 RVV-bord D1: ‘Rotondebord’

Echter, na de Weense Conventie in 1968[26], is per 1 maart 1971 in Duitsland uit een oogpunt van Europese harmonisatie deze betekenis van dat bord vervallen. In Duitsland is daarop verschillend gereageerd. Algemeen werden de toeritten naar de pleinen van een

---

22 In Nijmegen is dat het Industrieplein, op het kruispunt Industrieweg / Energieweg, waarop aanvankelijk de regel gold dat verkeer op het plein voorrang had. Bron: GS-besluit van de provincie Gelderland d.d. 27 juni 1966, nr. 2363/49-1207.

23 Het plein in Zaanstad is later voorzien van verkeerslichten.

24 Met dit woord duidde K.J.B. Erné het idee van een tweedeling van het middeneiland aan: het niet-overrijdbare centrum en het overrijdbaar-verhoogde deel daar omheen. In de publicaties van het Transport and Road Research Laboratory (TRRL) in de periode 1977-1984 komt dit niet voor; in de huidige Engelse richtlijn (DTF, 2007) komt het begrip ‘Central overrun area’ alleen voor bij de ‘Compact Roundabout in an Urban Area’ met de toevoeging ‘may be required’.

25 De betekenis van dit bord luidt in het Reglement verkeersregels en verkeerstekens 1990 van Nederland (RVV 1990): ‘Rotonde, verplichte rijrichting’. Daarvoor was de toelichtende naam: ‘Verkeersplein; verplichte rijrichting’. In Duitsland betekende dat bord vóór 1971 ook, dat aan het verkeer op het plein voorrang moest worden verleend.

26 Weense Conventie en het Verdrag van Wenen zijn verkorte omschrijvingen van de Convention on Road Signs and Signals, ondertekend in Wenen op 8 november 1968. Het verdrag is tot stand gekomen onder auspiciën van de Verenigde Naties (Economic and Social Council).

voorrangsbord voorzien (Hartz, 1995), maar op diverse plaatsen – vooral op de pleinen van ondergeschikte betekenis – werden geen voorrangsborden geplaatst, zodat op die pleinen ook de regel ging gelden: 'verkeer van rechts voorrang'. In Nederland werd dat soms zo geïnterpreteerd, dat in Duitsland daarmee de algemene regel dat pleinverkeer voorrang heeft, was afgeschaft[27], wat uiteraard niet geheel juist was[28]. Het gevolg hiervan was wel dat de uniformiteit in Duitsland was verdwenen. In dezelfde periode waren verkeerslichten in opkomst, waarvan men onder verkeerskundigen in Duitsland veel verwachtte. Ook mede hierdoor nam de populariteit van verkeerspleinen in Duitsland af[29].

Zoals is opgemerkt in paragraaf 1.1.2, gold in Nederland slechts op enkele plaatsen de 'Duitse voorrangsregeling', d.w.z. 'pleinverkeer voorrang'. In Venlo was dit bijvoorbeeld verklaarbaar vanwege het grote aantal Duitsers dat Venlo bezoekt. Die gemeente heeft overigens ook na 1971[30] de regel 'pleinverkeer voorrang' gehandhaafd. In Nijmegen werd de voorrangsregeling wel 'gelijkgeschakeld'[31].

Na Duitsland waren het de Engelsen die de voordelen van de voorrangsregel 'pleinverkeer voorrang' ontdekten (Blackmore, 1963). En – in tegenstelling tot de landen op het continent – werd na uitgebreide proefnemingen de *offside priority*[32] in november 1966 als algemene regel voor rotondes in Engeland ingesteld[33] (Green, 1977). Daar is die regel na 1968 niet herzien. Dit betekent dus, dat in Groot-Brittannië al vroeg voldaan werd aan één van de belangrijke voorwaarden die nodig zijn om de rotonde succesvol te doen zijn: verkeer op de rotonde

---

In Nederland is 'Verdragen van Wenen' een verzamelterm voor negentien verdragen met daarin internationale afspraken over het verkeer. Deze zijn op 29 augustus 2007 aan de Staten-Generaal overlegd in het kader van de stilzwijgende goedkeuring. (Nieuwsbrief Verkeersrecht, oktober 2007).

27 Bron: een brief van een burger aan de politie van de gemeente Nijmegen, die attendeerde op een artikeltje in het Algemeen Dagblad d.d. 26 oktober 1970, waarin wordt aangekondigd dat op 1 maart 1971 in West-Duitsland een nieuw verkeersreglement van kracht wordt.

28 Naar de mening van Brilon betreft het zelfs een misvatting (bron: mededeling van W. Brilon d.d. 1 juni 2004 aan de auteur). Hoewel er in verschillende deelstaten verschillend mee werd omgegaan, was de officiële aanbeveling 'pleinverkeer voorrang', zie FGSV (1993), afbeeldingen 102 en 103.

29 Mededeling van I.A. Hansen op grond van persoonlijke herinnering. Brilon en Vandehey (1998) schrijven: "However, in the 1960s, for reasons which are unclear, roundabouts fell out favor and few new installations were designed. By the late 1980s roundabouts were seldom seen in Germany."

30 Bron: een niet gepubliceerd SWOV-rapport 'Rotondes ter discussie; Een discussie over de toepassing van rotondes, de regeling van het verkeer op rotondes en gewenst onderzoek daarnaar', van de hand van de Nederlandse rotondeonderzoeker van het eerste uur, J. van Minnen (oktober 1984).

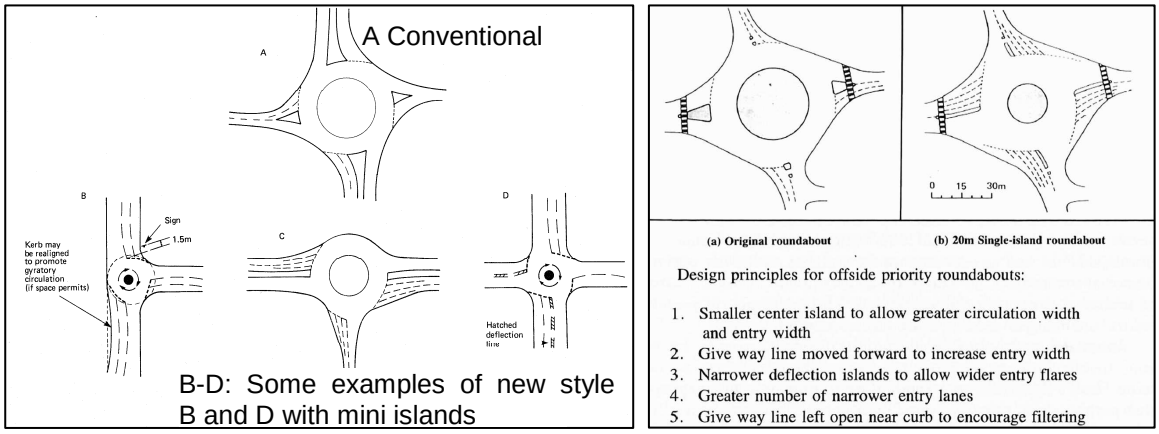
31 Nadat de gemeente Nijmegen geattendeerd was op het AD-bericht waarin de algemene wijziging van de voorrangsregeling per 1 maart 1971 op verkeerspleinen in Duitsland werd aangekondigd, is advies gevraagd bij de Provinciale Waterstaat van Gelderland. Die antwoordde: "Uit een oogpunt van verkeersveiligheid en verkeersduidelijkheid zou een gelijkschakeling van de voorrangsregeling gewenst zijn". De geraamde kosten bedroegen *f* 1.400. De situatie op het Energieplein werd – vermoedelijk februari / maart 1971 – veranderd, terwijl dit later formeel werd bekrachtigd bij B&W-besluit 4250, d.d. 17 maart 1972, onder intrekking van het GS-besluit van 27 juni 1966.

32 Offside priority = voorrang voor voertuigen die naderen via een tak die aansluit aan de andere kant van de weg waarop men zich bevindt. In Engeland is dat van rechts, in Nederland van links.

33 Dankzij de grote inzet van Frank Blackmore (1916-2008), die op 25 april 1963 de discussie hierover bij 'the Institution of Civil Engineers, Traffic Engineering Group' inleidde; zijn publicatie in Traffic Engineering & Control is daarvan een bewerking.

voorrang, zodat de rotonde zichzelf niet vastzet. Daardoor kon de Engelse roundabout relatief klein blijven, zodat ook de snelheden niet al te hoog werden[34].

Het succes van de kleine rotonde bracht het Britse Road Research Laboratory[35] in 1968 er toe om ook proeven te nemen om de capaciteit van rotondes op een klein oppervlak te vergroten door het middeneiland te verkleinen[36]. Figuur 1.1-7 geeft een illustratie van de in Engeland toegepaste modellen. Uit de studie van Green (1977) bleek, dat het vervangen van een 'conventional roundabout'[37] door een 'mini-roundabout'[38] tot bijna een verdubbeling (factor 1,9) van het aantal letselongevallen leidde. Toch waren die mini-roundabouts nog aanmerkelijk veiliger[39] dan voorrangskruispunten en kruispunten met verkeerslichten.



Figuur 1.1-7 Schetsen van Engelse Roundabouts[40]

De mini-roundabout wordt in Engeland eveneens als element in satellite roundabouts – ook als magic roundabouts aangeduid – gebruikt (zie Bijlage B.1).

In Frankrijk stond de overheid in 1974 toe om de 'Britse en Duitse voorrangsregeling' toe te passen door voorrangsborden op de toeritten naar de rotonde te plaatsen[41]. In enkele steden

---

[34] Ook Todd bijvoorbeeld ziet dit als essentieel voor de moderne rotonde: "The introduction of offside priority at roundabouts in Britain changed the driver's task from merging and weaving to the task of accepting a gap in circulating traffic. With the concept of the large radii necessary to facilitate weaving maneuvers at high speed abandoned, efficient operation now depend on measures taken to reduce speed and facilitate gap acceptance" (identieke zin in 1989 en 1991).

[35] Ook op initiatief van Blackmore (http://roundabouts.pbworks.com/w/page/8825816/Miniroundabout%20History, geraadpleegd 21-4-2012).

[36] Op een drietaksrotonde met een diameter van 29 m nam de capaciteit van 3700 vtg/h toe tot 4700 vtg/h nadat het middeneiland was verkleind tot 3 m en de toerit was ingedeeld in meer rijstroken.

[37] Dat is een tweestrooksrotonde met een diameter van ca. 60 m, waarop de takken weliswaar niet radiaal aansluiten, maar het verkeer door een middeneiland fysiek gedwongen wordt uit te buigen.

[38] Een rotonde met dezelfde buitendiameter, maar waarvan het middeneiland sterk is verkleind, zodat het aantal rijstroken uitgebreid kan worden tot drie à vier, terwijl de takken – door versmalling van de verkeersgeleiders – meer radiaal aansluiten.

[39] 30 à 40 % minder letselongevallen en 46 à 60% minder ongevallen met ernstig letsel.

[40] Het linker deel is afkomstig uit Hilary Green (1977) en het rechter deel uit Todd (1991), die het heeft ontleend aan Blackmore and Marlow, *Improving the Capacity of Large Roundabouts*, Crowthorne, Transport and Road Research Laboratory, Report LR 677, 1975

[41] Instruction interministérielle sur la signalisation routière, III, ch. 13, art 43-5, 1974. Geciteerd uit Todd, 1988. Thans bestaat dat artikel in dit hoofdstuk met diverse bepalingen niet meer, maar wordt in

van Bretagne, vooral Quimper, werden succesvolle proeven met pleinen in de voorrang genomen. Dat leidde tot meer proeven in ongeveer twintig steden. Mede door de publicaties van Jean le Coz (1982) kwam dat onderwerp in CEMT[42]-verband op de Europese agenda. Op 6 september 1983 werd de regel 'rotondeverkeer voorrang' in Frankrijk opgenomen in de nationale instructie voor verkeerstekens (Thai Van en Balmefrezol, 2000).

Na Engeland volgden behalve Frankrijk ook andere landen, waaronder Australië en enkele Scandinavische landen[43]. Ook in Zwitserland werd een voorzichtig begin gemaakt met rotondeverkeer in de voorrang[44]. Daarentegen bleef in Nederland de belangstelling nog vele jaren minimaal. Mogelijk kan dit mede veroorzaakt zijn door de vele geregistreerde kop-staartongevallen op het Koninginneplein voor het station in Venlo[45]. Toch werd de oplossing 'voorrang op plein' veelal om andere, vaak onduidelijke, redenen afgewezen, samen met het afwijzen van verkeerspleinen in het algemeen. Door de provincie Gelderland gebeurde dit nog in januari 1981 in een interne notitie, als reactie op een voorstel dat eind 1980 op initiatief van Erné, door de gemeente Beuningen werd gedaan voor de geplande rotonde Schoenaker/Adrianussingel[46].

Radiaal aansluitende takken

In 1984 werd in Wessem de eerste enkelstrooksrotonde aangelegd, die bewust met radiaal aansluitende takken werd uitgevoerd. Dit gebeurde op voorstel van Erné[47], die toen werkzaam

---

hoofdstuk I 'SIGNAUX D'INTERSECTION ET DE PRIORITE' volstaan met artikel 42-10 *'Carrefours à sens giratoire'*.

42 De Conférence Européenne des Ministres de Transport (CEMT) of European Conference of Ministers of Transport (ECMT) is in 1953 door een aantal Europese landen opgericht om het beleid m.b.t. internationaal transport te coördineren. In het jaar 2006 heeft de CEMT zich omgevormd tot het *International Transport Forum* en is nu onderdeel van de Organisatie voor Economische Samenwerking (OESO, of OECD als afkorting van de Engelse naam).

43 Zie bijvoorbeeld presentaties uit verschillende landen in: http://nmfv.dk/PDF-filer/Vejnormalgruppen/Seminar_stockholm_juli_2011/ (geraadpleegd 29-2-2012).

44 Bovy (1992) rapporteert 19 rotondes in 1980.

45 De ongevallen op het Koninginneplein in Venlo werden voornamelijk veroorzaakt doordat afslaande auto's moesten stoppen voor fietsers die met voorrang de afvoertak overstaken. Daarnaast kunnen ook andere factoren een rol hebben gespeeld: de opdeling van de rotondebaan in drie smalle rijstroken, die langer zijn dan in Maastricht om te weven en in te halen (Erné 1994a) en onoverzichtelijkheid door beplanting in het rotonde-eiland. (Erné, 1994b). Daarbij moet bedacht worden, dat op deze verkeerspleinen de zijtakken tangentieel zijn aangesloten en niet radiaal, zodat de snelheden relatief hoog zijn. Daarnaast kwamen daar ook letselongevallen met fietsers voor. Al met al was het hoge aantal ongevallen (ca. 100 per jaar) geen reclame voor de regel 'pleinverkeer voorrang'.

46 Een zin uit die notitie luidde: "Het aanbrengen van de rotonde op deze wijze en op deze plaats – in een toch min of meer voor (sneller) 'doorgaand' verkeer bestemde route – is naar mijn mening af te raden. Ondanks de hier en daar opklinkende positieve reacties (in de bebouwde komsfeer en met 'Duitse voorrang') komt het mij zowel uit veiligheids- als uit afwikkelingsoverwegingen ongewenst voor de rotonde – met zo kleine afmetingen – te realiseren". Deze zin uit genoemde interne notitie laat zien dat ideeën voor een kleine voorrangsrotonde al in 1980 bij Erné leefden, maar niet geaccepteerd werden bij de 'beslissers'. Overigens is de rotonde wel gebouwd, maar met een gelijkwaardige voorrangsregeling, dus verkeer van rechts voorrang.

47 Erné heeft de auteur meegedeeld, dat dit idee geboren is na een RONA-onderzoek naar rotondes; dat onderzoek zelf leverde niet zoveel aanknopingspunten op, maar bij een overall beschouwing van de

was bij Directie Verkeersveiligheid en voor oostelijk Nederland verantwoordelijk was voor de uitvoering van twee subsidieregelingen: de Bijdrageregeling AVOC[48] en de BREV[49]. Aanvankelijk was het [50]een kruispunt van gelijkwaardige wegen, met een poot naar de autosnelwegtoerit. Het was een ongevallenconcentratiepunt. Daar is toen, binnen het profiel van het oorspronkelijke kruispunt (de trottoirbanden zijn niet aangepast), met een buitenstraal van 12 m een rotonde met een 'tweetraps eiland'[24] aangelegd. De achtergrond van het 'tweetraps eiland' was tweeledig: het moet voldoende omvang hebben (om de snelheid er uit te halen) en toch moeten ook vrachtauto's de rotonde kunnen passeren. De eerste trap werd afgescheiden met een trottoirband in een cirkel met een straal van 5,5 m, waar vrachtwagens over kunnen rijden, en verder naar binnen weer een trottoirband, met een kleinere straal (van 4 m), die een hoger gelegen middeneiland begrensde, bestemd voor groenbeplanting[51]. Op dat moment werd de voorrangsregel op dit punt nog niet aangepast: de aanvoertakken hadden aanvankelijk nog voorrang.

Het volgende plein, waarop kort daarna de nieuwe vormgeving ook gerealiseerd werd, betrof de reconstructie van het verkeersplein St. Annadal in Maastricht[52]. Daar werd de voorrang omgedraaid (pleinverkeer kreeg voorrang[53]), de rijbaan op de rotonde werd versmald tot een enkele rijstrook en de takken werden iets verlegd zodat ze radiaal aansloten. Op dit plein ontmoetten de twee componenten die de moderne rotonde tot zo'n succes maakten in Nederland elkaar in feite voor het eerst (1984/1985). Later volgden Alphen aan den Rijn (Burg. Bruinsslotsingel/Kennedylaan), Losser (Gronausestraat/Broekhoekweg) en Wassenaar (Lange Kerkdam/Van Oldenbarneveltweg)[54], waar kruispunten door nieuwe rotondes werden vervangen. Ondertussen werd er ook onderzoek gedaan naar de verkeersafwikkeling en de

---

onderzochte rotondevormen en de geregistreerde ongevallen viel het hem op, dat rotondes op de punten waar de takken – toevallig – vrij radiaal op het plein aansloten opvallend weinig ongevallen plaatsvonden.

48 AVOC is de afkorting van Aanpak VerkeersOngevallen Concentraties. De Bijdrageregeling was een subsidieregeling waarin het rijk bijdroeg in de analysekosten (aanvankelijk 80 %, later een vast bedrag) en in de aanlegkosten (80 %).

49 BREV is de afkorting van Beschikking Rijksregeling Experimenten in Verblijfsgebieden, die sinds 6 april 1977 voorzag in het geven van financiële steun aan gemeenten voor het uitvoeren van herinrichtingsprojecten binnen de bebouwde kom, teneinde kennis te vergaren over verkeersveiligheidsvoorzieningen in verblijfsgebieden. Het meewerken aan evaluatieonderzoek was een voorwaarde voor subsidieverlening.
Op grond van beide regelingen is subsidie verleend in de aanleg van nieuwe rotondes, afhankelijk van de plaats van het kruispunt. Via die subsidieverlening heeft Erné gemeenten over de streep getrokken om de nieuwe rotonde toe te passen.

50 Het betrof het kruispunt De Lange Beemden / Pastoor Janssenstraat in Wessem.

51 Voor dat ontwerp heeft Erné in 1991 de NIDIG-prijs ontvangen (Nederlands Instituut van Directeuren en Ingenieurs Gemeentewerken).

52 In publikatie 24 van het CROW (1989) wordt in Bijlage 1: *Locaties van 'nieuwe' verkeerspleinen* dit verkeersplein als eerste genoemd.

53 Erné heeft de auteur meegedeeld, dat dit idee geboren is na kennis genomen te hebben van een rapport van het Transport Road Research Laboratory.

54 Deze rotonde staat in CROW-publikatie 24 als nummer 22 genoemd. Als Alphen a/d Rijn tot het Groene Hart wordt gerekend, is dit het eerste moderne verkeersplein in de Randstad. Dit verkeersplein is bekend geworden door een dodelijk ongeval met een fietser, waarna de rotonde is voorzien van een fietspad met fietsers uit de voorrang. Later is de fietsvoorrang weer 'gelijkgeschakeld' met de regel: binnen de bebouwde kom 'fietsers in de voorrang'.

verkeersveiligheid van de moderne rotonde. Toen bleek, dat de nieuwe rotondes ook voor het fietsverkeer voldoende veilig waren (Van Minnen, 1991) kwam de aanleg in een stroomversnelling. Daarbij betekende het feit dat Nederlandse verkeerskundigen als vakantiegangers in Frankrijk kennis maakten met de explosieve groei van het aantal rotondes, een stimulans om ze ook in Nederland op ruimere schaal toe te passen.

In 1987 is op de Verkeerstechnische Leergang[55] voor het eerst aandacht besteed aan 'het nieuw type verkeersplein' waarop het verkeer voorrang heeft en de takken haaks aansluiten (Erné, 1988). In 1989 heeft het CROW, nationaal kennisplatform voor infrastructuur verkeer, vervoer en openbare ruimte[56], de eerste publicatie uitgebracht over dit 'nieuwe verkeersplein' (CROW, 1989)[57]. In 1993 werd daarop een vervolg uitgebracht onder de naam *Rotondes* (CROW, 1993). Met name is daarin de maatvoering van het overrijdbare gedeelte van het middeneiland aangepast, terwijl ook de oplossing met fietsers op vrijliggende fietspaden in de voorrang voor het eerst in een officiële publicatie werd opgenomen. Daarna is in 1998 publicatie 126 *Eenheid in rotondes* verschenen (CROW, 1998). Die "vervangt de eerdere publicaties geheel en gaat onder andere in op algemene voorrangsregelingen op rotondes, de voorrangsregeling voor fietsers en de gewenste vormgeving hierbij" (citaat uit het 'Ten geleide').

Toepassingen buiten de bebouwde kom

Na enige aarzeling verschenen er ook buiten de bebouwde kom nieuwe rotondes, zoals in de oude rijksweg Amersfoort-Apeldoorn (Amersfoortseweg) bij Nieuw Milligen (thans N302/N344), waar in november 1989 een kruispunt met verkeerslichten werd vervangen door een rotonde[58].

---

[55] De Verkeerstechnische Leergang werd van 1952 tot en met 2010 jaarlijks door de ANWB georganiseerd. Sinds 2010 is het samengevoegd met de Verkeerkundige Werkdagen (georganiseerd door het CROW) tot het Nationaal Verkeerskundecongres.

[56] CROW is de afkorting van de vroegere naam 'Stichting Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek'.

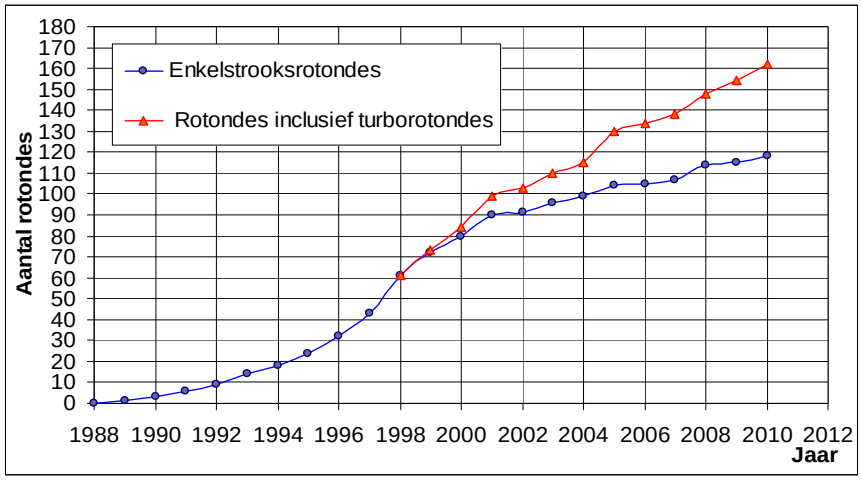
[57] Als kenmerken van deze nieuwe verkeerspleinen werden genoemd:
- rijbaan met één rijstrook op het verkeersplein;
- voorrang voor verkeer op het verkeersplein;
- geen complexe verkeerssituaties (3 of 4 aansluitende takken);
- radiale (90^0) aansluitingen van de takken op het verkeersplein.

Er kwamen drie basisoplossingen voor: verkeersplein met fietsstroken (zonder enige verhoging tussen rijbaan en fietsstrook), verkeersplein met vrijliggende fietspaden waarbij de voorrang is 'omgedraaid' en een verkeersplein zonder afzonderlijke fietsvoorzieningen (fietsverkeer en overig verkeer gemengd).

[58] Op initiatief van Erné. Aanvankelijk was dat idee verworpen, maar het werd weer opgepakt nadat Erné in een presentatie voor H.M. koningin Beatrix vertelde dat hij ook voor dit kruispunt een voorstel had gedaan om de verkeerslichten te vervangen door een rotonde. Dat ontlokte bij de koningin de opmerking: 'O, dat kruispunt waar ik 's nachts zo lang voor niets moet wachten (na een bezoek aan mijn zus)'. De toenmalige minister van Verkeer en Waterstaat, Smit-Kroes, verzocht om een toelichtende notitie, die de aanleiding werd om de uitvoering van een reeds gemaakt schetsplan daadwerkelijk ter hand te nemen (mededeling van Erné aan de auteur). Het betreft een oude Rijksweg namelijk RW 329 later 829. Deze rotonde is gerealiseerd met bestek G4620 (1989) en in november 1989 in gebruik genomen.

Door de provincie Zuid-Holland is de eerste moderne rotonde gebouwd in 1989 (gereedgekomen november 1989) te Bergschenhoek in de N472 (Boterdorpseweg/Bergweg zuid)[59]. Daar ging de provinciale weg over in een gemeentelijke weg. Daarom werd die locatie als eerste gekozen, omdat er twijfels bestonden of de kleine rotonde niet in strijd was met het doorgaande karakter van een provinciale weg[60].

In deze provincie[61] werd de moderne rotonde pas echt na 1991 geaccepteerd, als antwoord op het inzicht verkregen via het Duurzaam Veilig-concept (zie paragraaf 2.1.1). In de studie gerapporteerd in *Kosten Duurzaam Veilig; consequenties voor provinciale wegen* (PZH, 1993,) zijn bijvoorbeeld 111 potentiële locaties voor een rotonde onderzocht[62]. Figuur 1.1-8 geeft een beeld van de ontwikkeling in de aanleg van rotondes in het provinciale wegennet van Zuid-Holland. In deze grafiek is – vooruitlopend op het vervolg – het jaarlijks aantal gerealiseerde turborotondes gesuperponeerd op het aantal enkelstrooksrotondes.



Figuur 1.1-8 Aantal gerealiseerde rotondes op de provinciale wegen Zuid-Holland[63]

---

59 Deze rotonde is geïnitieerd door D.T. Kramer, verkeerskundige bij de provincie Zuid-Holland, nadat hij als lid van een interprovinciale overleg 'Vergadering verkeersveiligheidinspecteurs' overtuigd werd door de inzichten van Erné, die als rijksambtenaar ook aan die vergaderingen deelnam.

60 In 1988 had P.J.A. van Rest, verkeerskundige bij de provincie Zuid-Holland – na in Frankrijk tijdens vakantie kennis gemaakt te hebben met de moderne rotonde – voorgesteld om op het kruispunt van de N214/N482 (Provinciale weg/Zeemanskade) te Graafstroom een rotonde aan te leggen voor verbetering van de veiligheid. In het 'Verkeersoverleg' onder leiding van de auteur werd toen een kleine rotonde in een ruraal gebied als niet passend bij het doorgaande karakter van een provinciale weg van de hand gewezen. In 1989 zijn op dit kruispunt verkeerslichten geplaatst en in 2001 is het ter verbetering van de veiligheid van plateaus voorzien. In 2008 is dit kruispunt alsnog vervangen door een rotonde.

61 Omdat de ontwikkeling van de turborotonde gezien moet worden tegen de achtergrond van het verkeersbeleid in de provincie Zuid-Holland, wordt de ontwikkeling in de aanleg van rotondes alleen van deze provincie meer in detail geschetst. Volgens het Nationaal Wegenbestand lagen er in 2010 ongeveer 3.900 volwaardige rotondes in Nederland, waarvan ongeveer 1.900 met een diameter tussen 20 en 30 m; rotondes met die diameter zijn gewoonlijk enkelstrooks. Ongeveer driekwart van de 3.900 rotondes ligt op gemeentelijke wegen (bron: SWOV).

62 Na de gemeenteraadsverkiezingen in 1994 is een samenvatting hiervan met de achterliggende filosofie naar alle pasbenoemde wethouders met verkeer in hun portefeuille gezonden (Fortuijn, 1994a).

63 Het betreft een overzicht van aangelegde rotondes. Door overdracht van wegen is thans het aantal rotondes in beheer bij de provincie Zuid-Holland lager.

1.1.3 Conclusies

Het is opmerkelijk, dat bij de bedenker van het eerste gerealiseerde verkeersplein, Eno, bijna alle ideeën die de moderne rotonde tot een succes maken al terug te vinden zijn. Echter, zowel bij hem[64] als bij Hénard is het idee van 'het weven van ononderbroken verkeersstromen' een essentieel onderdeel van het pleinconcept. Zelfs werden – weliswaar in strijd met het weefconcept – zeer kleine rotondes gerealiseerd. Hoewel er in de VS veel verkeerspleinen werden gebouwd, waren de tegenkrachten echter zo groot[65], dat daar het concept van de moderne rotonde toch niet is doorgebroken. In het vervolg is de regel *'rechts voorrang'* daaraan mede debet geweest, doordat op verkeerspleinen het verkeer zichzelf vastzette (Brown, 1995, p.35). Eno zag de regel *'pleinverkeer voorrang'* als onderdeel van een totaalconcept van *'links voorrang'*[66]. Niet moet worden uitgesloten dat bij de tegenstanders het afwijzen van de regel *'pleinverkeer voorrang'* onderdeel vormde van het afwijzen van zijn meer generieke concept.

Ook is het opmerkelijk, dat in het land waar *'rotondeverkeer voorrang'* tot in de betekenis van een verkeersbord was geregeld – Duitsland –, evenmin het concept van de moderne enkelstrooksrotonde als eerste is doorgebroken.

Het land waar de rotonde wel zijn positie in het verkeersbeeld wist te behouden en te versterken was Engeland. Enerzijds is dat te danken aan enkele wegbeheerders die het vastlopen van Engelse rotondes oplosten door *'offside priority'* in te stellen. Hierdoor werd impliciet het concept van convergeren en weven door twee partijen vervangen door een zowel qua verkeersafwikkeling als qua veiligheid beter concept. Maar wellicht nog belangrijker is, dat deze vernieuwende initiatieven op hun effecten werden onderzocht. In 1963 rapporteerde Blackmore, onderzoeker van het Road Research Laboratory, een toename van de capaciteit met 10 % en een afname van de verliestijd met 40 % als de effecten van het instellen van *'rotondevoorrang'*, terwijl ook het aantal letselongevallen significant afnam met ongeveer 40% (Blackmore, 1963). Verder is ook belangrijk, dat het niet gebleven is bij de onderzoeken in de jaren zestig, maar dat het Transport and Road Research Laboratory[67] het onderzoek naar rotondes ook later heeft voortgezet[68].

---

[64] De basis in zijn denken is – ondanks het toepassen van kleine rotondes – het convergeren c.q. weven van voertuigen, dat in zijn concept probleemloos verloopt: "It (rotary traffic) is a no-stop system, distributing vehicles comparatively evenly over the surface of the roadway in stead of bunching them as does the block system" (van regelende politieagenten die het verkeer op straten – gecoördineerd – wisselend doorgang verlenen, Eno, The Simplification of higway Traffic uit 1929, p. 68).

[65] In New York City bijvoorbeeld vreesden politiemensen in 1914 voor hun baan (a.w, p. 166).

[66] In zijn boek behandelt hij 'links voorrang' alleen aan de hand van tekeningen van standaard kruispunten (op pp. 15 en 16), terwijl hij er in het hoofdstuk 'The rotary system' niet meer op terugkomt.

[67] De naam van Road Research Laboratory (RRL) is in 1972 veranderd in Transport and Road Research Laboratory (TRRL) en heet thans TRL. Op de website is te lezen: Originally established in 1933 as part of the UK government, TRL privatised in 1996 to become a fully independent private company.

[68] Te noemen zijn het onderzoek naar de verkeersafwikkeling: TRRL-Report 334 (Kimber and Semmens, 1977), TRRL-909 (Kimber and Hollis, 1979), en TRRL 942 (Kimber, 1980) maar minstens zo belangrijk ook de onderzoeken naar de veiligheid van rotondes: TRRL 774 (Green, 1977), TRRL 1120 (Maycock and Hall, 1984).

Maar ook in landen waar na Engeland het vernieuwde verkeersplein werd toegepast, werden effectstudies gerapporteerd. Zo meldden Franse studies[69] begin jaren tachtig door de aanleg van enkelstrooksrotondes reducties van letselongevallen tussen de 27% en 83%. Hetzelfde gebeurde in landen die later volgden. In Nederland bijvoorbeeld door de SWOV (Van Minnen, 1986 en 1990) maar ook door wegbeheerders[70].

Vermeldenswaard is ten slotte, dat op de Nederlandse rotonde niet alleen binnen de bebouwde kom de takken radiaal aansluiten maar dat dit ook buiten de bebouwde kom het geval is. Verder is een belangrijk verschil met het ontwerp in de Angelsaksische landen, dat de afritten radiaal aftakken. Dit betekent dat motorvoertuigen de rotonde ook met lage snelheid verlaten, wat voor de veiligheid van het langzame verkeer – dat ook de rotondeafrit moet oversteken – van groot belang is.

1.2 Principe enkelstrooksrotonde

Het concept van de rotonde die in Nederland sinds 1984/1985 wordt toegepast, is een rotonde:
- zonder weefbewegingen,
- waar het verkeer op de rotonde voorrang heeft en
- waarop de takken radiaal aansluiten[71].

Hierdoor zet het verkeer op de rotonde zichzelf niet meer vast, de conflictpunten zijn voor de weggebruiker duidelijk herkenbaar, terwijl de snelheden laag liggen. Dit betekent dat op een klein oppervlak een hoge verwerkingscapaciteit wordt gecombineerd met een veilige verkeersafwikkeling. Daardoor is de moderne enkelstrooksrotonde een succes geworden: het is een belangrijk instrument om kruispunten duurzaam veilig te maken. In een onderzoek met gegevens uit de jaren 1987-1994 van 177 pleinen werd bij ombouw van drie- en viertaks kruispunten tot rotondes een afname van het jaarlijks aantal verkeersslachtoffers van 76% gemeten (Van Minnen, 1995).

Qua verkeerskundig concept is het verschil tussen het oude verkeersplein en de moderne rotonde zo groot (zie Figuur 1.2-1), dat in de Nederlandse richtlijnen het begrip rotonde alleen wordt gebruikt voor een verkeersplein waarop de takken radiaal aansluiten en waar het verkeer op de rotonde voorrang heeft[72]. Dit concept wordt in Nederland ook buiten de bebouwde kom toegepast, waar rotondeschilden de bestuurder ervan doordringen dat recht-

---

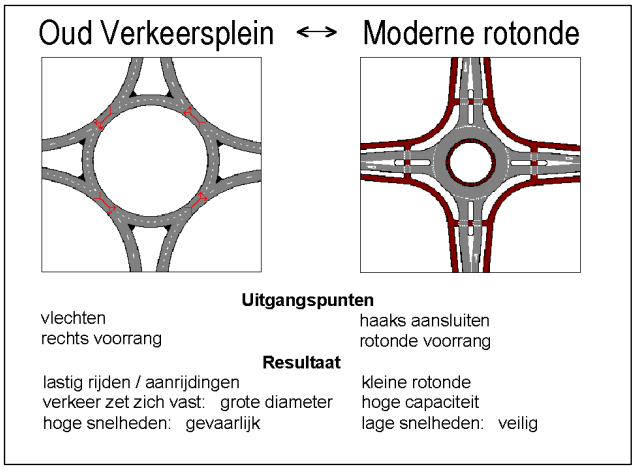
[69] SETRA (1983) Carrefour Giratoires ―analyse de sécurité, Bagneux, en CEE-Ouest (1986) Evolution de la Sécurité sur le Carrefours Giratoires, Nantes (geciteerd bij Todd, 1986).

[70] Bijvoorbeeld het rapport van de provincie Zuid-Holland *Verkeersveiligheid provinciale wegen 1997*, bevatte een afzonderlijke paragraaf 3.2 *Evaluatie rotondes*, waarin voor 18 van de reeds 33 aangelegde rotondes het veiligheidseffect bepaald kon worden: 61% reductie van het totaal aantal ongevallen en 80% reductie van het aantal slachtofferongevallen (beide ongecorrigeerd, zie hoofdstuk 6).

[71] Hierin wijkt de Nederlandse rotonde van begin af aan af van bijvoorbeeld de Britse (Arem en Kneepkens, 1992). Dat geldt ook voor de afvoertakken, wat voor de veiligheid van het overstekende langzame verkeer van groot belang is.

[72] In CROW-publicatie 126 'Eenheid in rotondes' zijn deze begrippen als volgt omschreven:
Verkeersplein: Gelijkvloers kruispunt waar het verkeer in een rondgaande beweging wordt afgewikkeld en dat wordt aangeduid met bord D1 (RVV 1990).
Rotonde: Plein waar het verkeer op het plein voorrang heeft en waarop de wegen radiaal aansluiten.

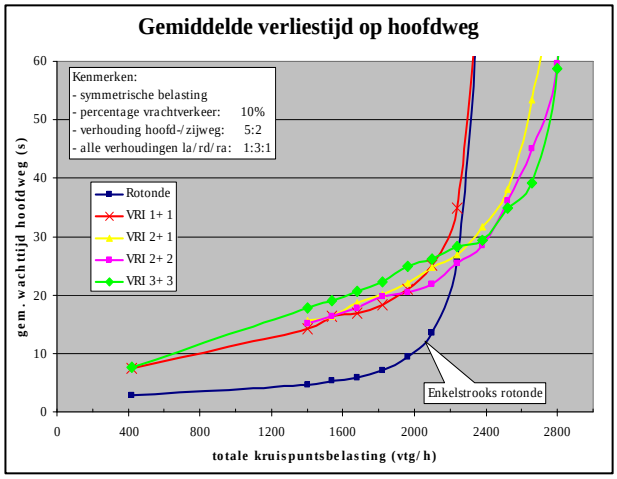
door rijden onmogelijk is (zie Bijlage D2). In het convenant van 15 december 1997, Startprogramma Duurzaam Veilig, kwamen alle wegbeheerders overeen, dat per 1 januari 2001 alle verkeerspleinen omgebouwd zouden zijn tot een moderne rotonde[73].



Figuur 1.2-1 Verkeersplein en rotonde

Voor inzicht in de bijdrage die een rotonde kan bieden in de verkeersafwikkeling zijn modellen nuttig. In Nederland heeft de ROTONDEVERKENNER van TNO (Van Arem, 1992) een belangrijke rol gespeeld om de wegbeheerders een indruk te geven van de te verwachten verkeersafwikkeling bij het realiseren van een enkelstrooksrotonde.

Figuur 1.2-2 geeft een beeld van het verschil in verliestijd op een rotonde en verschillende viertakskruispunten met verkeerslichten[74].



Figuur 1.2-2 Vergelijking verliestijd van een rotonde met verkeerslichtenkruispunt *(bron De Leeuw, 2001)*

In de wijziging van het RVV van 27 mei 1999 is de omschrijving van bord D1 *Verkeersplein, verplichte rijrichting* vervangen door *Rotonde, verplichte rijrichting*, zodat de verwijzing bij het begrip verkeersplein naar dit bord in CROW-publicatie 126 niet meer up-to-date is.

[73] Dat werd weliswaar niet overal gerealiseerd, maar dat waren uitzonderingen: de Stichtse rotonde (N221/N237) te Amersfoort bijvoorbeeld kende op 24 april 2002 nog steeds voorrang van rechts bij tangentieel aansluitende takken. Eind 2003 bleek de voorrangsregeling gewijzigd, terwijl in november 2005 de takken radiaal waren aangesloten (constateringen door de auteur).

[74] De berekeningen zijn uitgevoerd met een simulatieprogramma (Hutsim). Daarin is ook rekening gehouden met de geometrische verliestijd die op een rotonde optreedt (de naam van de verticale as is in het artikel niet geheel juist). De betekenis van VRI 1+1: hoofd- en zijwegen 1 opstelstrook; VRI 2+1: hoofdwegen ook een opstelstrook voor linksaf; VRI 2+2: hoofd- en zijwegen 1 opstelstrook voor rechtdoor en 1 opstelstrook voor linksaf; VRI 3+3: hoofd- en zijwegen voor elke richting een opstelstrook.

Een aantal zaken valt op:

a. bij een totale verkeersbelasting[75] < 2000 vtg/h is de gemiddelde wachttijd op de hoofdweg naar een rotonde kleiner dan bij een met verkeerslichten geregeld kruispunt (uitgaande van intensiteit zijverkeer = 40% intensiteit hoofdweg);
b. zonder extra opstelstroken heeft een met verkeerslichten geregeld kruispunt geen hogere capaciteit dan een rotonde;
c. een kruispunt met verkeerslichten heeft dankzij extra opstelstroken een hogere capaciteit.

1.3 Aanleiding en probleemstelling

De enkelstrooksrotonde biedt een veilige[76] verkeersafwikkeling, die ook vlot verloopt zolang de verzadigingsgraad niet boven ca. 80% uitkomt. Het veiligheidseffect van de aanleg van concentrische tweestrooksrotondes is kwestieus, omdat dan opnieuw weefconflicten worden geïntroduceerd. Bij hogere intensiteiten kunnen met verkeerslichten geregelde kruispunten door het toevoegen van extra opstelstroken een hogere capaciteit bieden, maar de veiligheid daarvan vormt een probleem (SWOV, 1998). Dit leidde voor de auteur tot de uitdagende probleemstelling:

'Is het mogelijk een tweestrooksrotonde te ontwerpen die soortgelijke veiligheidskenmerken heeft als de enkelstrooksrotonde?'

Twee overwegingen vormden de basis voor deze vraagstelling:

- het was bekend dat op de vroegere verkeerspleinen in Zuid-Holland (bijvoorbeeld het Lammenschansplein te Leiden[77]), veel schampongevallen plaatsvonden als gevolg van weefmanoeuvres en letselongevallen waarbij vooral fietsers betrokken waren;
- kruispunten die met verkeerslichten worden geregeld[78], bereiken niet het veiligheidsniveau van de moderne enkelstrooksrotonde.

Deze vraagstelling leidde bij de auteur op 3 oktober 1996 tot de vondst van het concept van de turborotonde (zie hoofdstuk 3). Vervolgens is de eerste turborotonde gebouwd als een onderdeel van de Kluifrotonde Coldenhove, als aansluiting van de N220 (Coldenhovelaan) aan de A20 te Maasland; deze is gereedgekomen in mei 1999. De eerste turborotonde in zuivere vorm is gerealiseerd door het waterschap IJsselmonde en de gemeente Barendrecht, ten noorden van de aansluiting Rotterdam-Lombardijen op de A15 en wel in 2000[79].

---

[75] Onder kruispuntbelasting of rotondebelasting wordt verstaan de som van de verkeersbelasting op de aansluitende takken in de naderingsrichting.

[76] De gemeten afname van (letsel)ongevallen door aanleg van rotondes is uitzonderlijk hoog in vergelijking tot het effect van andere verkeersveiligheidsmaatregelen. Zie bijvoorbeeld Van Minnen (1995) en PZH (1994-2003).

[77] In het rapport *Verkeersveiligheid 1970* (PZH, 1971) is dit een ongevallenconcentratie waarop tussen de 20 en 30 ongevallen per jaar plaatsvonden. Helaas is al voor het jaar 2000 het bronmateriaal door de provincie vernietigd in het kader van de gebruikelijke opschoonwerkzaamheden van het archief .

[78] Hoewel begin 1996 al plannen voor kruispuntplateaus in combinatie met snelheidscamera's bij verkeerslichten in ontwikkeling waren, werd het veiligheidseffect daarvan ingeschat op een reductie van het aantal letselongevallen met ca. 40 % (Fortuijn, 2000d). Later is gebleken dat het effect op kruispunten buiten de bebouwde kom bijna 50 % bedroeg (Fortuijn, Carton en Feddes, 2005a). Dit is – ook achteraf – kleiner dan het veiligheidseffect van de turborotonde. Zie hoofdstuk 6.

[79] Op 28 oktober 2012 meldde D. de Baan op zijn website www.dirkdebaan.nl/turborotondes.html dat er wereldwijd 299 turborotondes door hem waren geregistreerd, waarvan 244 in Nederland. Daarin zijn ook rotondes en pleinen meegerekend die geen zuivere turborotondes zijn.

De uitdaging is in 2000 verbreed tot de vraagstelling: *'Is het mogelijk om een verkeersplein dat met verkeerslichten wordt geregeld met soortgelijke kenmerken als de turborotonde te ontwerpen?'* Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van het turboplein (zie hoofdstuk 5).

1.4 Doelstelling en onderzoeksvragen

Het doel van dit proefschrift is de mogelijkheden te onderzoeken om *meerstrooks*rotondes te ontwikkelen die grote verkeersstromen op een veilige en vlotte wijze kunnen afwikkelen. Onderscheid zal worden gemaakt tussen rotondes (zonder verkeerslichten) en verkeerspleinen met verkeerslichten[80]. De onderzoeksvragen zijn:

- Wat zijn de theoretische overwegingen bij een veilig en efficiënt ontwerp voor een meerstrooksrotonde? (Hoofdstuk 2)
- In hoeverre voldoen bekende rotondevormen aan criteria voor een goed functioneel ontwerp? (Hoofdstuk 2)
- Hoe kunnen deze criteria vertaald worden in praktische ontwerpregels? (Hoofdstuk 3)
- Waar liggen de grenzen voor de dimensionering van rotondes zonder verkeerslichten? (Hoofdstuk 3)
- Wat is de capaciteit van dergelijke rotondes? (Hoofdstuk 4)
- Wat zijn de criteria voor het ontwerpen van rotondes met verkeerslichten? (Hoofdstuk 5)
- Bieden verkeerspleinen met verkeerslichten voordelen boven geregelde viertaks-kruispunten en zo ja, onder welke voorwaarden? (Hoofdstuk 5)
- Wat zijn de resultaten qua veiligheid van de gerealiseerde ontwerpen? (Hoofdstuk 6)
- Wat zijn de praktijkervaringen met reeds gerealiseerde oplossingen? (Hoofdstuk 6)
- Welke conclusies en aanbevelingen t.a.v. een veilig en efficiënt ontwerp kunnen getrokken worden en wat zijn de randvoorwaarden voor toepassing? (Hoofdstuk 7)
- Welke problemen vragen nog om een oplossing? (Hoofdstuk 7).

---

[80] Het onderscheid tussen de begrippen 'rotonde' en 'verkeersplein met verkeerslichten' wordt hier gehanteerd tegen de achtergrond van een principieel verschil in verkeersafwikkeling. In het vervolg zal blijken dat de drie genoemde kenmerken van de moderne enkelstrooksrotonde (verkeersafwikkeling niet gebaseerd op weven, pleinverkeer voorrang als de lichten buiten werking zijn en takken die radiaal aansluiten) uit paragraaf 1.2 op zowel de turborotonde als het turboplein van toepassing zijn, met één uitzondering – de afvoertakken sluiten tangentieel aan in plaats van radiaal. Dat zou ervoor kunnen pleiten om voor beide categorieën het begrip 'rotonde' te hanteren. De auteur kiest ervoor om het eerstgenoemde argument de doorslag te laten geven en onderscheidt daarom de 'turborotonde' van het 'turboplein'. Ook gebruikt de second edition van de Amerikaanse Rotondehandleiding nu ook uitsluitend het begrip 'Signalized traffic circles' (TRB, 2010) in plaats van 'Signalized roundabouts' of 'Fully signalized rotary' (FHWA, 2000). Zie ook paragraaf 2.4.3).
Vanwege de aanvankelijk oppositie tegen de turborotonde bij degenen die rond 1997/1998 betrokken waren bij de totstandkoming van de CROW-publicatie '*Eenheid in rotondes*' – de turborotonde doorbrak de uniformiteit – (Van Minnen, 1999), heeft de auteur besloten in 2000 het begrip 'rotonde' in de titel van de bijdrage aan de Verkeerskundige Werkdagen te vermijden. In *'Turbopleinen: een beproefd concept in een nieuw jasje'* is het concept gepresenteerd als een klein verkeersplein met spiraalbelijning, dat toch wel voldeed aan alle formele kenmerken van een rotonde. Inderdaad gingen er tijdens het congres stemmen op, om het begrip 'turbo*rotonde*' geheel te vermijden. Na deze discussie is om inhoudelijke redenen door de auteur het begrip 'turborotonde' consequent gehanteerd, in onderscheid van het grotere 'turboplein' met verkeerslichten.

1.5 Aanpak en wetenschappelijk bijdrage van de studie

Tegen de achtergrond van bestaande concentrische rotondes staan in deze studie spiraalvormige tweestrooksrotondes centraal. Aangetoond wordt, dat de moderne enkelstrooks rotonde zeer goed past in het concept Duurzaam Veilig, terwijl de concentrische tweestrooksrotonde belangrijke elementen daarvan mist. Dit proefschrift laat zien dat de ontwikkeling van zowel de turborotonde als het turboplein hierin wel is ingebed. Een consequente toepassing van de uitgangspunten daarvan heeft geleid tot een innovatief ontwerp voor de turborotonde[81] met fysieke scheiding van rijbanen waardoor een effectieve snelheidsbeheersing wordt bereikt en een verkeersafwikkeling zonder weefbewegingen.

In het ontwerpproces is de focus gericht op de elementen die van belang zijn voor het realiseren van de veiligheidscriteria, zonder een goede verkeersafwikkeling en comfortaspecten uit het oog te verliezen[82]. Tegen die achtergrond wordt aandacht besteed aan de ontwerpaspecten die bepalend zijn voor de verkeersafwikkeling en de veiligheid. Uitgaande van het basisconcept van de turborotonde zijn voor wisselende belastingpatronen mogelijke varianten van de rijstrookconfiguratie ontwikkeld.

Aangetoond zal worden, dat het ‘turboprincipe’ potentieel een hogere capaciteit biedt dan de compacte tweestrooksrotonde, die evenals de turborotonde beoogt snijconflicten te voortkomen. Daartoe is een uit de literatuur bekend capaciteitsmodel – gebaseerd op de hiaatacceptatie-theorie – gemodificeerd op basis van waarnemingen. Sinds 2000 is het mogelijk geworden ook waarnemingen te doen aan de verkeersafwikkeling op de turborotonde. Rekening houdend met de beperkingen van het beschikbare onderzoeksmateriaal uit 2001 en 2007, wordt de theoretische benadering getoetst. Na een literatuurverkenning en een beperkte parameterschatting voor zowel het lineaire model van Bovy als verschillende hiaatacceptatie-modellen is gekozen voor de hiaatacceptatie-modellen van Tanner en Troutbeck (voor toeritstroken naar een enkelstrooks rotondesegment) en van Fisk en Hagring (voor toeritstroken naar een tweestrooks rotondesegment). Deze modellen worden zowel op geaggregeerd voertuigniveau als op stroomniveau geschat. Dat maakt het mogelijk te onderzoeken in hoeverre het noodzakelijk en mogelijk is modelparameters en wellicht ook de modelstructuur aan te passen.

Ten aanzien van de ontwikkeling van het turboplein zal dit proefschrift ingaan op de vraag welke uitgangspunten dezelfde kunnen zijn als die voor de turborotonde en waarin een plein met verkeerslichten – ook qua geometrisch ontwerp – een andere benadering vereist voor het bereiken van een optimale verkeersafwikkeling. Aangetoond zal worden, dat de verkeersprestatie van een turboplein beter is dan die van een traditioneel viertakskruispunt.

---

[81] In 2009 is de turborotonde genomineerd voor de Delft Design and Engineering Award, http://www.citg.tudelft.nl /nl/ actueel/laatste-nieuws/artikel/detail/delft-design-engineering-award-ddea-een-succes/ (geraadpleegd 18 juni 2012).

[82] Dat geldt zowel het proces zelf als de beschrijving daarvan in dit proefschrift.

Afgesloten wordt met een vergelijking van de gemeten verkeersveiligheidseffecten van de turborotonde, die een aanwijzing vormen dat het beoogde doel ook inderdaad wordt gerealiseerd.

1.6 Opbouw van dit proefschrift

Rotondes en verkeerspleinen met verkeerslichten zijn netwerkknooppunten, die op een bepaalde manier zijn vormgegeven. Voor die vormgeving zijn zowel de netwerkfunctie als de taakbelasting van de bestuurder van groot belang. Vanuit dat gezichtspunt krijgt in hoofdstuk 2 de nieuwe vorm van de tweestrooksrotonde zijn taxonomische plaats als een kruispunttype geëigend voor gebiedsontsluitingswegen, die evenals de enkelstrooksrotonde in zijn vormgeving voldoet aan de kenmerken van het Duurzaam Veilig-concept.

In hoofdstuk 3 wordt de ontwikkeling en vormgeving van de turborotonde beschreven. Met als randvoorwaarde dat het nieuwe type meerstrooksrotonde veiliger dan de concentrische tweestrooksrotonde moet zijn, zullen verschillende hoofdvormen van de turborotonde worden afgeleid. Daarbij wordt ook aandacht bestreed aan die ontwerpaspecten die voor het goed functioneren van een dergelijke rotonde van belang zijn.

De bedoeling van de turborotonde is het verwerken van meer verkeer dan de enkelstrooksrotonde en de compacte, concentrische tweestrooksrotonde. In hoofdstuk 4 worden de analytische modellen voor de capaciteit van rotondetoeritten op hun geschiktheid voor gebruik ten behoeve van de turborotonde onderzocht. Het meest daarvoor in aanmerking komende model (van Hagring, dat tevens een generalisatie is van andere hiaatacceptatie-modellen) wordt gemodificeerd, zodat het geschikt is voor de Nederlandse rotondevorm met radiaal aansluitende takken. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een vergelijking van de capaciteit van de turborotonde met die van de Duitse compacte, concentrische tweestrooksrotonde.

In hoofdstuk 5 wordt allereerst onderzocht wat de toegevoegde waarde van verkeerslichten kan zijn op de moderne enkelstrooksrotonde en de turborotonde. Specifieke aandacht wordt besteed aan rotonde-doseerinstallaties (RDI's) op turborotondes. Omdat ook hiermee niet de capaciteitsgrens is bereikt die met gelijkvloerse kruispunten met een rondgaande verkeersbeweging mogelijk is, wordt vervolgens het ontwerpprincipe verkend van een verkeersplein waarvan de vormgeving is toegesneden op toepassing van verkeerslichten. Die verkenning wordt afgesloten met een vergelijking van de verkeersvolumes die een dergelijk plein kan verwerken met die van een viertakskruispunt met verkeerslichten.

In hoofdstuk 6 worden de veiligheidseffecten en belevingsaspecten in kaart gebracht van zowel de eerste turborotonde als het eerste turboplein.

Afgesloten wordt met een samenvatting en conclusies in hoofdstuk 7.

2 Taxonomie van kruispunten en rotondes

Dit hoofdstuk beoogt een systematische classificatie van kruispunt- en rotondetypen te bieden. De weginfrastructuur maakt in zijn functioneren onderdeel uit van een verkeerssysteem waarin een samenspel plaatsvindt tussen de mens als verkeersdeelnemer, het voertuig en de weg. Algemeen wordt dit aangeduid als het mens-voertuig-wegsysteem. Dit betekent dat in het ontwerp van de weginfrastructuur zowel rekening moet worden gehouden met gedragsaspecten als met voertuigtechnische aspecten. De verkeerskunde, psychologie en voertuigtechniek reiken de ontwerper van de verkeersinfrastructuur de kwaliteitseisen aan voor de beoordeling van het ontwerp.

Het Duurzaam Veilig-principe biedt een theoretisch uitgangspunt voor het postuleren van belangrijke ontwerpprincipes, waaraan ontwerpen ook meer in detail kunnen worden getoetst Uitgaande van algemene toetsingscriteria wordt in dit hoofdstuk een kader voor primaire ontwerpprincipes geschetst (paragraaf 2.1). In een wegennet maken de knooppunten het uitwisselen van verkeer tussen de verschillende wegen mogelijk. Dit biedt het theoretisch kader voor de beschouwing van kruispuntoplossingen. In paragraaf 2.2 worden knooppunten en kruispunten geordend naar functie, waarbij de kruispunten met gebiedsontsluitingswegen worden uitgelicht. In paragraaf 2.3 worden kruispunten onderscheiden naar vorm en regelgeving. De vormen die van belang zijn voor kruispunten met gebiedsontsluitingswegen worden geselecteerd voor een nadere beschouwing vanuit de Duurzaam Veilig-optiek. Daarvan zijn rotondes een onderdeel.

Dit hoofdstuk sluit af met paragraaf 2.4 waarin plein- en rotondevormen een plaats krijgen vanuit een indeling gebaseerd op meer algemene geometrische ontwerpaspecten, voorbijgaand aan het Duurzaam Veilig-principe. Daarbij wordt ook expliciete aandacht besteed aan de indeling die door Tranportation Reseach Board - Federal Highway Administration (USA) wordt gevolgd, en waaraan ook door vertegenwoordigers uit andere landen is meegewerkt.

2.1 Kader voor een functionele indeling

Functionele eisen van wegverkeersinfrastructuur kunnen worden benaderd vanuit verschillende invalshoeken. Voor de vertaling naar primaire ontwerpprincipes zijn twee invalshoeken van belang: de netwerkfunctie van de aansluitende wegen en de verkeerstaak. Voor de netwerkfunctie is het waarborgen van een goede bereikbaarheid het centrale aspect. Een voldoend hoge (gemiddelde) snelheid draagt daaraan bij. Bezien vanuit de verkeerstaak werkt hogere snelheid verhogend op de foutkans en verergert deze de gevolgen van een fout. Naast snelheid en conflicten tussen verkeersstromen spelen ook andere factoren een rol in de taakbelasting, zoals de complexiteit van te nemen beslissingen gerelateerd aan de snelheid waarin verschillende besliscycli elkaar moeten opvolgen.

2.1.1 Duurzaam Veilig-concept

De wegcategorisering, gebaseerd op het concept Duurzaam Veilig (SWOV, 1992), beoogt de integratie van de netwerkfunctie en de verkeerstaak. Oorspronkelijk werden drie veiligheidsprincipes onderscheiden:

1. functioneel gebruik: voorkomen van onbedoeld gebruik van infrastructuur;
2. homogeen gebruik: voorkomen van grote verschillen in snelheid, richting en massa bij matige en hoge snelheden;
3. voorspelbaar gebruik: voorkomen van onzekerheid bij verkeersdeelnemers.

In de SWOV-publicatie *Door met Duurzaam Veilig* zijn in 2005 daaraan nog twee principes toegevoegd: vergevingsgezindheid en statusonderkenning (Tabel 2.1.1).

Tabel 2.1.1 De vijf Duurzaam Veilig-principes

Duurzaam Veilig-principe	Beschrijving
1. Functionaliteit van wegen	Monofunctionaliteit van wegen, stroomwegen, gebiedsontsluitingswegen, erftoegangswegen, in een hiërarchisch opgebouwd wegennet
2. Homogeniteit van massa's en/of snelheid en richting	Gelijkwaardigheid in snelheid, richting en massa bij matige en hoge snelheden
3. Herkenbaarheid van de vormgeving van de weg en voorspelbaarheid van wegverloop en van gedrag van weggebruikers[83]	Omgeving en gedrag van andere weggebruikers die de verwachtingen van weggebruikers ondersteunen via consistentie en continuïteit van wegontwerp
4. Vergevingsgezindheid van de omgeving en van weggebruikers onderling	Letselbeperking door een vergevingsgezinde omgeving en anticipatie van weggebruikers op gedrag van anderen
5. Statusonderkenning door de verkeersdeelnemer.	Vermogen om (eigen) taakbekwaamheid te kunnen inschatten.

[83] Hier is niet de volgorde aangehouden van de publicatie uit 2005, maar die van de SWOV-Factsheet 'Achtergronden bij de vijf Duurzaam Veilig-principes' (http://www.swov.nl/rapport/Factsheets/NL/Factsheet_Duurzaam_Veilig_principes.pdf) omdat die aansluit bij de opsomming in de oorspronkelijke publicatie uit 1992.

Voor een duurzaam veilig wegverkeerssysteem is essentieel, dat niet langer een perfect functionerende mens als maatstaf voor een ontwerp wordt genomen, maar dat wordt uitgegaan van de mens met zijn beperkingen. Monofunctionaliteit op netwerkniveau leidt niet zonder meer tot homogeniteit in het verkeersproces. Homogeniteit van voertuigen qua snelheid is essentieel zowel voor een goede uitoefening van de verkeerstaak als de beperking van gevolgen van fouten. Het slechts indelen van wegen in drie wegcategorieën en die zo inrichten dat deze voor de weggebruiker herkenbaar zijn (zie par. 2.1.2), is onvoldoende om ook het gewenste veiligheidseffect te bereiken (Fortuijn en Paulussen, 1992a). Het homogeniteitprincipe is daarvoor minstens zo belangrijk.

Een belangrijk aspect daarvan is, dat de snelheid van alle verkeersdeelnemers ter plaatse van conflictpunten laag moet zijn. Tabel 2.1.2 – met gegevens van wegen volgens een meer traditionele indeling– biedt een goed inzicht in het belang hiervan.

Tabel 2.1.2 Letselrisico's verschillende wegtypen in Nederland; historische gegevens[84]

Wegtype	Maximum-snelheid	Slachtoffer-ongevallen per miljoen vtgkm	Verkeersdoden per miljard vtgkm
Woonerf (optimaal ingericht[85])	15 km/h	0,04	-
Woonerf/woonstraat in 30 km/h-zone	15/30 km/h	0,20	-
Woonstraat	50 km/h	0,75	12,2
Stedelijke verkeersader	50 km/h	1,33	25,3
Wegen voor alle verkeer bubeko[86]	80 km/h	0,64	46,2
Wegen bubeko met geslotenverklaring	80 km/h	0,30	19,8
Autowegen	100 km/h	0,11	18,3
Autosnelwegen	100/120 km/h	0,07	5,1

Twee wegtypen springen er qua veiligheid positief uit:

- optimaal ingerichte woonerven;
- autosnelwegen.

Dit levert het volgende inzicht op. Het optreden van ongevallen is een gevolg van de combinatie van conflict en snelheid. Op een autosnelweg is de snelheid hoog, maar het aantal potentiële conflicten gering; in een woonerf is daarentegen het aantal potentiële conflicten groot, maar de snelheid laag. Beide leiden tot een relatief veilige situatie. Deze toespitsing van het algemene homogeniteitprincipe biedt een sleutel voor het werken aan een inherent veilig wegverkeerssysteem: breng alle potentiële conflictpunten in het wegennet in kaart en kies dan consequent uit de volgende twee mogelijkheden (Fortuijn, 1992a, b en c, 1994a):

- óf het conflictpunt elimineren;
- óf de snelheid ter plekke tot ca. 30 km/h reduceren[87]

---

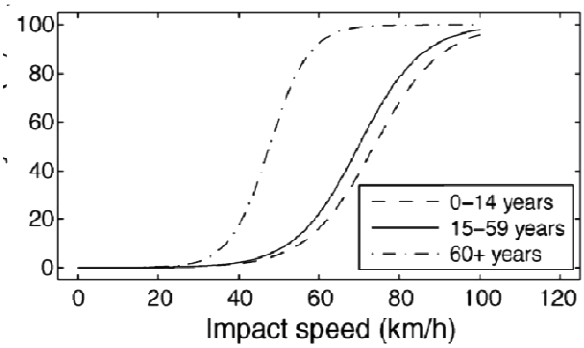
[84] Diverse bronnen: M.J. Koornstra: 'Veiligheid in transportmodi; samenhang diversiteit en overdraagbaarheid', bijdrage aan *Symposium Toekomstig transport; veiligheid voorzien*?, Delft, mei 1991, met latere aanvullende gegevens van de SWOV. Ook voor de wegen van de provincie Zuid-Holland is de ontwikkeling van deze cijfers gevolgd. Het aantal slachtofferongevallen per miljoen voertuigkm is in de periode 1993 - 2001 afgenomen van 0,38 tot 0,26, terwijl het aantal verkeersdoden per miljard voertuigkilometer afnam van 22 naar 8,8.

[85] Zonder doorgaand bromfietsverkeer.

[86] Bubeko is een afkorting voor 'buiten de bebouwde kom'. Een weg met 'geslotenverklaring' is voorzien van RVV-bord C09.

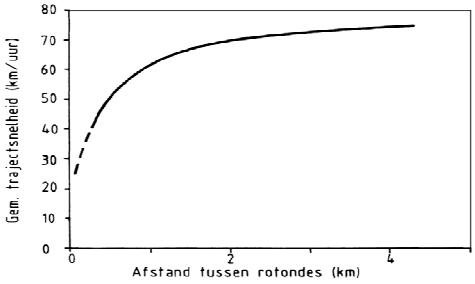
[87] Bij de keuze van 30 km/h speelt vooral de aanwezigheid van langzaam verkeer een rol. Tingvall & Haworth (1999) noemen 50 km/h als maximale snelheid bij flankconflicten tussen personenauto's.

Het belang van snelheidsreductie[88] op conflictpunten wordt geïllustreerd in Figuur 2.1-1.



Figuur 2.1-1 Het risico om dodelijk te verongelukken bij aanrijding door een motorvoertuig als functie van de aanrijding-snelheid voor voetgangers van verschillende leeftijdsklassen [89]

Duidelijk is, dat voor het toepassen van deze aanpak een differentiatie in bereikbaarheid nodig is. In het dilemma tussen bereikbaarheid (wens: hoge snelheid) en veiligheid (noodzaak lage snelheid ter plaatse van conflictpunten) is een gestructureerde spreiding van conflictpunten een vereiste. Immers, als ter plaatse van alle gelijkvloerse aansluitpunten de snelheid van alle verkeersdeelnemers laag moet zijn, is er maar één manier om een wegenstelsel te krijgen dat toch voldoende verkeerskwaliteit biedt: het wegenstelsel zo inrichten dat er duidelijk aanwijs-bare wegen ontstaan waar de kruispuntafstand voldoende groot is, zodat op die wegen een acceptabele trajectsnelheid gerealiseerd kan worden. Figuur 2.1-2 toont bijvoorbeeld de invloed van de gemiddelde afstand tussen rotondes op de gemiddelde trajectsnelheid op 80 km/h-wegen (Fortuijn, 1993 en 1994a. Naarmate de afstand tussen de rotondes kleiner wordt, des te sterker neemt de gemiddelde snelheid af.



Figuur 2.1-2 Relatie tussen rotondeafstand en gemiddelde trajectsnelheid [90]

Dit betekent dat het vaststellen van grenzen voor een optimale kruispuntafstand een belangrijk onderdeel is van een goede wegcategorisering. Deze wordt in hoge mate bepaald door de maaswijdte van de verschillende wegcategorieën. De maaswijdte van het wegennet is de resultante van de afweging van een groot aantal belangen. Daarvan is het kwaliteitsaspect 'bereikbaarheid' een wezenlijk onderdeel[91] (Fortuijn en Kramer, 1995a). In het kader van deze studie staat echter de verkeerstaak als invalshoek centraal.

---

88 In de verkeerspsychologie is snelheid belangrijk voor de tijd die beschikbaar is in de informatieverwerkingcyclus: *waarnemen – beslissen – handelen.* Deze tijd heeft grote invloed op de foutkans (Bijlage C.2). In het concept Duurzaam Veilig speelt snelheid een meervoudige rol: niet alleen is deze van belang voor de kans dat de bestuurder een fout maakt, maar ook voor de mogelijkheden om correcties uit te voeren (door de andere partij) en vooral voor de botsenergie die bepalend is voor de ernst van de afloop.

89 Bron: Davis (2001), ontleend aan Rosén et al. (2011). Dat literatuuroverzicht laat ook zien dat in meer recentere studies de functies boven de 50 km/h minder steil verlopen.

90 Uitgangspunt is dat personenauto's steeds met een vaste waarde versnellen tot de maximum toegestane snelheid van 80 km/h en daarna weer afremmen tot de rotondedoorrijsnelheid. Als twee rotondes zeer dicht bij elkaar liggen wordt die maximum snelheid niet bereikt (gestippeld deel van de curve).

91 In de Nota Planbeoordeling (PZH, 1995) was de norm voor de gemiddelde afstand tussen aansluitingen op provinciale wegen: in landelijke gebieden 2 tot 4,5 km en in verstedelijkte gebieden 1 tot 1,5 km.

2.1.2 Wegcategorieën

Indeling

De Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid (SWOV) hanteert in haar publicatie *Naar een duurzaam veilig wegverkeer* drie wegcategorieën:

- stroomweg (SW);
- gebiedsontsluitingsweg (GOW);
- erftoegangsweg (ETW).

Stroomwegen (Engels: *through-roads*) hebben als verkeersplanologische functie het verbinden van gebieden over een grotere afstand, waarvoor ze doorgaand verkeer snel moeten kunnen verwerken. Ze kenmerken zich door afwezigheid van gelijkvloerse kruispunten.

De verkeersplanologische functie van gebiedsontsluitingswegen (Engels: *distributors*) is het verdelen van het verkeer over de gebieden. De kenmerken van de gebiedsontsluitingswegen zijn:

- op de wegvakken is (bijna alleen) sprake van een stroomfunctie, met een maximumsnelheid die afhankelijk is van de directe wegomgeving, de kruispuntafstand en de toegelaten verkeerssoorten;
- tussen de kruisende wegen onderling vindt voor (alle) verkeerssoorten de uitwisseling gelijkvloers plaats op een zodanige wijze, dat de onderlinge snelheidsverschillen klein zijn.

Buiten de bebouwde kom dienen de gebiedsontsluitingswegen voorzien te zijn van parallelwegen, zowel ten behoeve van de ontsluiting van erven als voor de afwikkeling van langzaam gemotoriseerd verkeer. Binnen de bebouwde kom dienen de gebiedsontsluitingswegen – zonder erfontsluitingen – te zijn voorzien van fietspaden, die – met uitzondering op de kruispunten[92] – goed zijn afgescheiden van de rijbaan.
Ook worden in de gebiedsontsluitingswegen twee typen onderscheiden:

- wegtype I: dubbelbaansweg, dwarsprofiel met 2x2 rijstroken;
- wegtype II: enkelbaansweg, dwarsprofiel met 2x1 rijstroken.

Door de provincie Zuid-Holland is in nieuwe situaties wegtype II ook uitgevoerd als dubbelbaansweg, met één rijstrook per baan, met een middenberm zonder aanvullende beveiliging. In de praktijk blijkt het ongevalrisico op dat wegtype uitzonderlijk laag te liggen: op wegvakken ca. 0,04 slachtofferongevallen (SLO) per miljoen voertuigkilometer[93]. Ter

---

[92] Bij kruispunten binnen de bebouwde kom is het aan te bevelen om in de gevallen dat de fiets mede in de voorrang is opgenomen de fysieke scheiding tussen fietsvoorziening en autoverkeer op te heffen (mits de autobestuurders een goed zicht op de fietsers hebben, wat bij rotondes problematisch is). Van Minnen (SWOV) vermoedt zelfs dat het opheffen van suggestiestroken ter plaatse van kruispunten tot een hogere veiligheid leidt.

[93] Bron: jaarlijks rapport *Verkeersveiligheid provinciale wegen* in de periode 1994–2003 (PZH, 1994 t/m 2003). Het betreft de wegvakken: N215, km 6.5 – 12.2 (Goedereede) en N222 (Naaldwijk-Wateringen). Lange tijd was het aantal slachtofferongevallen per miljoen voertuigkilometer op het wegvak N 206, km 6.9- 8.6 ook zeer laag (0,03 SLO/10^6vtgkm, periode 1991-1995, a.w. 1996), maar door filevorming nam het aantal kop-staartbotsingen sterk toe met als resultaat 0,14 SLO/10^6vtgkm in de periode 1997-2002

reductie van (een klein aantal, maar) ernstige eenzijdige wegvakongevallen, is een semi-verharde berm essentieel (Braimaister en Fortuijn, 2005).

De laatste categorie is die van erftoegangswegen (Engels: *access roads*). Zij geven toegang tot de erven waar de sociaal-economische activiteiten plaatsvinden.

Deze wegcategorisering vormt het kader voor een functionele indeling van kruispunten. De indeling naar vormgeving en regelgeving hangt daarmee samen.

Afwikkelingskenmerken wegvakken en kruispunten per wegcategorie

In Tabel 2.1.3 zijn per wegcategorie naast de netwerkfunctie ook de afwikkelingskenmerken, onderscheiden naar wegvak en knooppunt, weergegeven (Fortuijn, 1996). Dit biedt de directe ingang tot twee verschillende indelingen, en wel naar:

- de combinatie van de categorieën van de op elkaar aansluitende wegen, uitgaande van de netwerkfunctie;
- de vormgeving en regelgeving van de kruispunten zelf, uitgaande van de verkeerstaak.

Tabel 2.1.3 Schema Wegcategorie – Netwerkfunctie – Verkeerstaak[94]

Duurzaam veilig categorie	Netwerkfunctie	Verkeerstaak	
		Afwikkelingskenmerk op wegvakken	Afwikkelingskenmerk op kruispunten
Stroomweg (SW)	Verbinden van gebieden	Stromen	Stromen
Gebiedsontsluitings-weg (GOW)	Ontsluiten: verdelen van het verkeer over gebieden, c.q. verbinden over kleine afstand	Stromen	Uitwisselen (ontmoeten met lage snelheid)
Erftoegangsweg (ETW)	Toegang verlenen tot erven	Uitwisselen (ontmoeten met lage snelheid)	Uitwisselen (ontmoeten met lage snelheid)

Zowel de stroomweg als de gebiedsontsluitingsweg worden getypeerd als verkeersader, terwijl de erftoegangsweg gekarakteriseerd wordt door zijn ligging in een verblijfsgebied (CROW-116, 1997b, Tabel 3). Een belangrijk inzicht van het Duurzaam Veilig-principe is, dat het gelijkvloers kruisen en uitwisselen van verkeersstromen dient te geschieden met lage

(hoger dan het gemiddelde voor wegvak-SLO op de provinciale wegen Z.-H.: 0,13 SLO/10^6vtgkm, a.w. 2003).

94 De basis voor deze tabel is als commentaar ingebracht op het concept van publicatie 116 *Handboek Categorisering wegen op duurzaam veilige basis* en is in aangepaste vorm (zonder de kolom netwerkfunctie) opgenomen als Tabel 1 en Tabel 3 in genoemde publicatie (CROW, 1997). In de oorspronkelijke tabel van de auteur was de netwerkfunctie 'ontsluiten' alleen toegelicht met: '*verbinden over korte afstand*'. De achtergrond hiervan is, dat veel verplaatsingen met de auto worden afgelegd zonder dat gebruik wordt gemaakt van een stroomweg. Met de karakterisering 'verdelen over gebieden' wordt gerefereerd aan het Engelse woord '*distributor*' waarvoor de SWOV gekozen heeft als vertaling van het begrip '*gebiedsontsluitingsweg*'.

snelheid. Dit vormt de basis voor de visie dat rotondes een integraal onderdeel vormen van de wegcategorie gebiedsontsluitingsweg[95] (zie laatste kolom Tabel 2.1.3).

2.2 Functionele ordening van kruispunttypen

Uitgaande van de indeling in wegcategorieën kan een functionele ordening in kruispunttypen worden gemaakt. In Tabel 2.2.1 is dit als schema weergegeven. Omdat op kruispunten van erftoegangswegen onderling geen turborotonde of turboplein voorkomt, vallen die verder buiten nadere behandeling.

Tabel 2.2.1 Functionele indeling van kruispunttypen

Categorie weg nr. 1	Categorie aansluitende weg nr. 2		
	SW	GOW	ETW
Stroomweg (SW)	A	B	-
Gebiedsontsluitingsweg (GOW)	B	C	D
Erftoegangsweg (ETW)	-	D	E

2.2.1 Stroomwegen onderling (A in Tabel 2.2.1)

De uitwisselingspunten van stroomwegen onderling worden veelal aangeduid met de naam verkeersknooppunt. Het kenmerk van de verkeersknooppunten is, dat de uitwisseling op stromen is gebaseerd (invoegen, weven en uitvoegen), terwijl de verkeersstromen – in het Duurzaam Veilig-concept – elkaar ongelijkvloers kruisen. Op stroomwegen passen geen rotondes. Een uitzondering kunnen kruispunten zijn waarbij één of meer 2x1 stroomwegen betrokken zijn. Dan kan een (deel)oplossing, gebaseerd op ontmoeten met lage snelheid, beter zijn dan een halfslachtige oplossing gebaseerd op stromen, maar met zulke krappe bogen dat men tot zo'n 30 à 50 km/h moet afremmen. Een vormgeving die duidelijk gebaseerd is op ontmoeten met lage snelheid, is dan voor de weggebruiker eenduidiger: er is dan lokaal sprake van een categorie-overgang naar een gebiedsontsluitingsweggedeelte[96].

2.2.2 Stroomweg met gebiedsontsluitingsweg (B in Tabel 2.2.1)

Het kenmerk van deze verkeersknooppunten is, dat het gedeelte dat aansluit op de stroomweg ook voldoet aan de kenmerken van een stroomweg. Dat wil zeggen: het verkeer voegt stromend in en uit. De delen die aansluiten op de gebiedsontsluitingsweg dragen de kenmerken daarvan: de uitwisseling is gebaseerd op ontmoeten met lage snelheid.
Voorbeelden van kruispunttypen van stroomwegen met wegen van het onderliggend wegennet zijn:

---

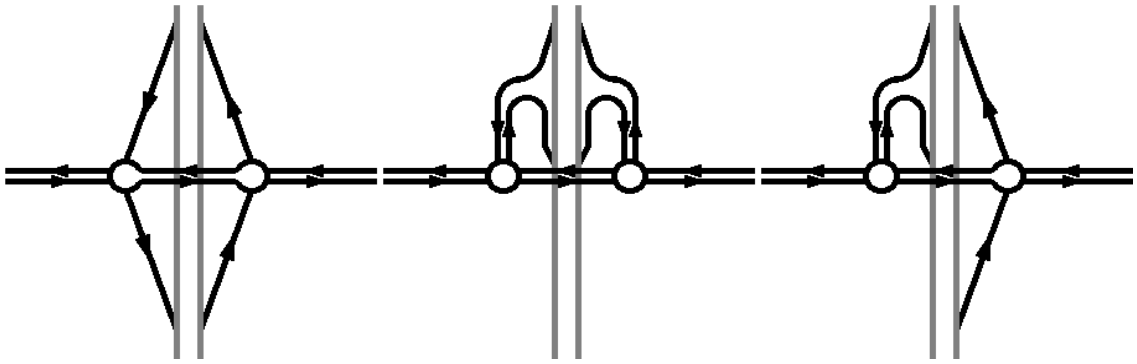
[95] Door de provincie Zuid-Holland is begin jaren '90 besloten om op de N231 dit principe uit te testen, nadat de eerste rotonde op die weg in 1990 was gerealiseerd. De uitvoering van dat plan werd ingehaald door de algemene acceptatie van rotondes in provinciale wegen, waarna tot 2004 de prioriteit van uitvoering werd bepaald door te verwachten kosteneffectiviteit qua veiligheid. De kosteneffectiviteit van rotondes is zo hoog, dat investeren in de aanleg van rotondes van de samenleving geen offer vraagt, maar macro-economisch winst oplevert (PZH,1993; Wesemann, 2000; PZH, 2001).

[96] Wel moet bij nadering van zo'n rotonde de categorie-overgang duidelijk worden ingeleid, bij voorkeur door verandering van het dwarsprofiel: bijvoorbeeld de middenberm over 100 m bestraten, en de vangrail vervangen door een barrier.

- Haarlemmermeer
- Half klaverblad
- Mengvorm Haarlemmermeer en half klaverblad (ter weerszijden van de stroomweg).
- Verkeersplein met fly-over
- Gevlochten Haarlemmermeer

Bij de eerste drie genoemde hoofdvarianten zijn de volgende oplossingen mogelijk op de kruisingsvlakken op het GOW-deel:

- voorrangskruispunten (met plateaus vóór de kruisingsvlakken voor het waarborgen van een voldoend veiligheidsniveau[97]) ;
- VRI-kruispunten[98] met plateaus vóór of na de stopstreep[97];
- rotondes.



***Figuur 2.2-1 Schema's van Haarlemmermeer** (hier in de vorm van een kluifrotonde**), half klaverblad** (hier in de vorm van een dubbelrotonde) **en mengvorm Haarlemmermeer en half klaverblad** (hier ook met gedeeltelijke kluifrotonde)*

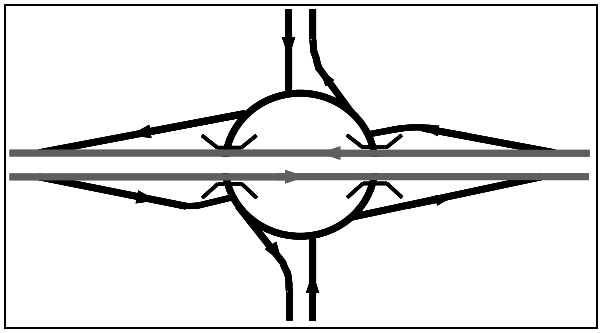
Het verkeersplein met fly-over is een hoofdvariant, naast de Haarlemmermeer- en half klaverbladaansluiting. Hoewel de aansluiting aan de autosnelweg overeenkomt met die van de Haarlemmermeeraansluiting, verschilt de aansluitvorm van de ondergeschikte weg wezenlijk: deze wordt uiteengelegd, zodat twee viaducten nodig zijn (Figuur 2.2-2, weergegeven als schema voor een turboplein).

De Gevlochten Haarlemmermeer-aansluiting (*Diverging Diamond Interchange*) is een betrekkelijk nieuwe vorm (Figuur 2.2-3). Deze is toegepast in Frankrijk en is via rijsimulaties onderzocht door de Federal Highway Administration (FHWA, 2007). Qua veiligheid biedt een dergelijk oplossing winst vanwege het kleiner aantal conflictpunten terwijl de snelheid van de doorgaande stroom door een hoekverdraaiing wordt afgeremd. Wanneer de

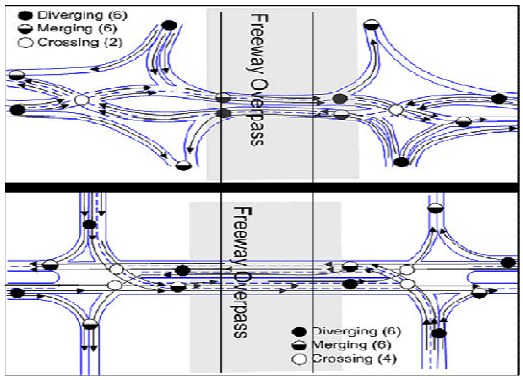
[97] Tabel 2.1.3 brengt de principiële motivering in beeld om plateaus als standaard kenmerk van kruispunten aan te merken in een wegcategorisering die is gebaseerd op het principe van Duurzaam Veilig. Onderzoek – gebaseerd op 69 locaties – laat een substantiële veiligheidswinst zien (Fortuijn et al., 2005a). Dit vermoeden bestond al rond 1994 (zie bijvoorbeeld Fortuijn, 1994c). De eerste kruispuntplateaus op provinciale wegen zijn echter pas in okober 1997 gerealiseerd op de Groene Kruisweg (N218) bij het kruispunt met de N57 (Brielle), nadat in één nacht na het uitvallen van het verkeerslicht verscheidene ongevallen hadden plaatsgevonden.

[98] De afkorting VRI-kruispunt staat voor: kruispunt met een verkeersregelinstallatie.

uitwisseling tussen de gebiedsontsluitingsweg en de stroomweg intensief is, biedt deze oplossing ook qua ruimtebeslag winst.



Figuur 2.2-2 Turboplein met fly-over



Figuur 2.2-3 Gevlochten Haarlemmermeer en standaard Haarlemmermeeraansluiting

2.2.3 Gebiedsontsluitingswegen onderling (C in Tabel 2.2.1)

Kruispunten tussen gebiedsontsluitingswegen onderling zijn gebaseerd op 'ontmoeten met lage snelheid'. Dan zijn weer de volgende principeoplossingen mogelijk:

- voorrangskruispunten (plateaus vóór de kruisingsvlakken);
- VRI-kruispunten (plateaus vóór of na de stopstreep);
- rotondes en met verkeerslichten geregelde verkeerspleinen.

In paragraaf 2.3.1 wordt toegelicht dat voorrangskruispunten problematisch zijn als twee gebiedsontsluitingswegen buiten de bebouwde kom elkaar ontmoeten. De mogelijkheden om in het wegalignement tot uitdrukking te brengen dat in plaats van voorrang te krijgen de bestuurder (op één van de twee wegen) voorrang moet verlenen, zijn beperkt.

2.2.4 Gebiedsontsluitingsweg met erftoegangsweg (D in Tabel 2.2.1)

Omdat kruispunten tussen gebiedsontsluitingswegen en erftoegangswegen ook uitgaan van 'ontmoeten met lage snelheid', wijkt deze groep niet van de voorgaande af. Ook hier kunnen drie hoofdvormen onderscheiden worden:

- voorrangskruispunten (plateaus vóór de kruisingsvlakken);
- VRI-kruispunten (plateaus vóór of na de stopstreep);
- rotondes.

2.3 Kruispuntindeling naar vorm en regelgeving

Uitgaande van de verkeerstaak kunnen kruispunten meer in detail worden ingedeeld naar de combinatie van vormgeving en regelgeving. In deze paragraaf wordt niet een uitputtende behandeling gegeven van kruispunten. Volstaan wordt met het (zo nodig) plaatsen van kanttekeningen bij kruispuntoplossingen zoals die voorkomen in het Handboek Wegontwerp (CROW-164, 2002) uitgaande van het Duurzaam Veilig-principe. Hier wordt met name ingegaan op kruispunten in gebiedsontsluitingswegen buiten de bebouwde kom – de kruispunttypen die qua functie uitwisselbaar zijn met een turborotonde of turboplein.

2.3.1 Voorrangskruispunten in gebiedsontsluitingswegen (GOW's)

Voorrangskruispunt in twee GOW's

Een voorrangskruispunt op een kruispunt van twee voorrangswegen betekent dat één van beide wegen bij nadering van het kruispunt impliciet van karakter verandert: van voorrangsweg wordt het een weg waarop het verkeer voorrang moet verlenen aan verkeer op de andere weg, terwijl veelal het wegbeeld (afgezien van de borden) een dergelijke overgang niet ondersteunt. Potentieel levert dat een gevarenpunt op. In het verleden werden daar dan ook vaak uit veiligheidsoogpunt verkeersregelinstallaties geplaatst.

Een voorrangskruispunt is in structureel opzicht geen goede oplossing voor twee GOW's die op elkaar aansluiten, omdat een voorrangskruispunt een ongelijkwaardigheid van wegen veronderstelt, die de weggebruiker noch vanuit zijn beleving van de weg (op alle eerdere kruispunten had hij voorrang) noch op grond van een globaal beeld van het kruispunt verwacht. Die verrassing treedt niet op als hij met een rotonde wordt geconfronteerd: al op afstand doemt voor de bestuurder het einde van de voorrangssituatie op.

Voorrangskruispunten waar een ETW aansluit op een GOW

Voorrangskruispunten zonder verkeerslichten moeten aan een aantal vormgevingseisen voldoen:

- maximaal één doorgaande rijstrook per rijrichting (veiligheidseis);
- óf linksafvakken, óf verhoogde middengeleiders, maar niet beide (want dat is onveilig);
- snelheidsremmende voorzieningen, zowel in de hoofdweg als in de zijweg;
- géén rechtsafvakken ter voorkoming van afdekongevallen.

In het Handboek Wegontwerp (CROW-164c, 2002) worden smalle rijbaansplitsingen naast linksafstroken aanbevolen (CROW-164c, par. 10.4.2.2). Uit veiligheidsstudies (Grontmij, 1995; Kulmala, 1995) blijkt echter, dat de combinatie van linksafvakken en middengeleiders niet beter is dan een situatie zonder één van beide voorzieningen[99]. In het Handboek Wegontwerp worden twee plateau-oplossingen getekend:

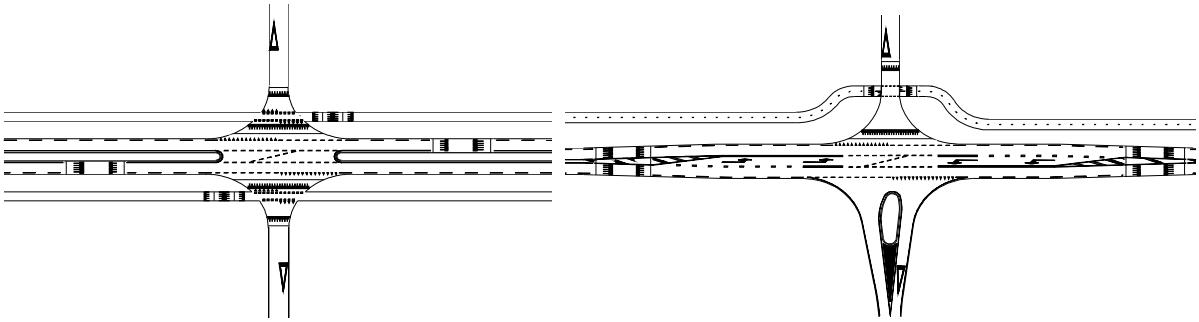
a) wanneer er een middengeleider aanwezig is, vóór de kruisingsvlakken (figuur 10-2, CROW-164c);
b) wanneer er geen middengeleider is, door middel van een verhoogd plateau op het kruisingsvlak (figuur 10-3, CROW-164c*)*.

Afgezien van het feit dat er in eerstgenoemde figuur samen met de middengeleider ook – risicoverhogende – linksafvakken zijn getekend, zijn de plateaus zeer dicht bij de zijweg

[99] In het Handboek Wegontwerp worden ongevallenreductiecijfers van middengeleiders vermeld (-10% op een T-aansluiting en -60 % op een viertakskruispunt, zonder bronvermelding), die in de oorspronkelijke publicatie (CROW-115, 1997a) betrekking hebben op de situatie dat er uitsluitend middengeleiders aanwezig zijn, zonder linksafvakken. Het risicoverhogend effect van de combinatie van middengeleiders en linksafvakken wordt niet vermeld. Dit risicoverhogende effect van middengeleiders naast linksafvakken hangt mogelijk samen met het feit, dat verkeersgeleiders (door de indruk die ze door hun hoogte wekken, ook al zijn ze smal) het proces van 'waarnemen – beslissen – handelen' in twee stukken knippen. Omdat die cyclus dan binnen twee seconden herhaald moet worden, wordt de foutkans vergroot, terwijl de totale oversteeklengte aanzienlijk is.

gesitueerd. Dit levert problemen op met inschatten van de aanrijsnelheid, wat capaciteitverlagend werkt. De auteur stelt in plaats daarvan de oplossing in het linker deel van Figuur 2.3-1 voor. Ook wanneer er geen middengeleider aanwezig is, verdient het in verband met de oversteekbaarheid[100] de voorkeur op enige afstand vóór het kruispunt de plateaus aan te brengen. De auteur stelt als alternatief van figuur 10-3, CROW-164c de oplossing in het rechter deel van Figuur 2.3-1 voor. In beide varianten geldt, dat de afstand van de plateaus in de hoofdweg tot de zijweg qua veiligheid en oversteekbaarheid optimaal is, wanneer bestuurders afzien van substantiële snelheidsverhoging tussen beide plateaus, maar de snelheidsvermindering vanaf de zijweg wel vroegtijdig wordt opgemerkt.

Als indicatie voor het te verwachten veiligheidseffect zij vermeld, dat op 29 kruispunten waar de situatie voor en na aanleg van plateaus met elkaar vergeleken werd, een reductie van het aantal slachtofferongevallen van 35% is gemeten (Fortuijn et al., 2005a). Omdat het een pilotproject betrof, zijn de voorzieningen op de zijwegen in die projecten achterwege gelaten.



***Figuur 2.3-1 Schets van een kruispunt: GOW/ ETW; oplossing a** (links[101]) **en b** (rechts[102])*

2.3.2 Verkeerslichten geregelde kruispunten met snelheidsremmende voorzieningen

Het principe van een verkeerslicht is het scheiden van conflicten in de tijd door middel van een optisch signaal. Uit ongevallenanalyses blijkt dat desondanks veel ongevallen bij verkeerslichten plaatsvinden, waaronder flankaanrijdingen met ernstige afloop. Het scheiden van conflicten in tijd blijkt dus onvoldoende te werken. Om kruispunten verkeersveiliger te maken moet daarom ook de snelheid worden gereduceerd. Deze benadering past binnen de algemene theorie die aan de Duurzaam Veilig-aanpak ten grondslag ligt.

---

[100] Een lagere naderingssnelheid van alle voertuigen leidt tot het accepteren van een kleiner hiaat, zoals het verschil in grootte van het kritisch hiaat op rotondes (< 4,3 s in FGSV, 2006) en kruispunten (> 5,6 s in Weinert, 2001) laat zien. Dit verschil treedt niet op (Weinert, a.w., blz. 115-118) als auto's individueel met een lagere snelheid naderen. De afstand tussen beide plateaus moet anderzijds ook weer niet zo groot zijn, dat auto's daar tussenin aanmerkelijk afremmen en optrekken.

[101] Oplossing a: GOW met middengeleider, maar zonder linksafvakken. In dit voorbeeld zijn fietspaden aanwezig, die in één richting bereden worden en niet uitbuigen (wegens verondersteld ruimtegebrek) en dan in de voorrang zijn opgenomen, maar voorzien van bromfietsdrempels. Uit onderzoek van TNO (Van de Horst, 1984) is gebleken, dat een horizontaal stuk van ca. 4,5 m nodig is tussen het conflictpunt en het einde van de helling van het plateau.

[102] Oplossing b: GOW met geschilderde linksafvakken en dan zonder middengeleider In dit voorbeeld is een in twee richtingen bereden fietspad aanwezig. De zijweg is aan de kant van het uitgebogen fietspad van een plateau voorzien; aan de overkant is een verkeersdruppel die snelheidverlagend werkt doordat het doorzicht belemmerd wordt, maar ook omdat deze een koersverandering noodzakelijk maakt voor het rechtdoorgaande verkeer.

Maatregelen om een snelheidsreductie te verkrijgen zijn het plaatsen van 50 km/h-borden. Indien dit onvoldoende blijkt te helpen, kan de maatregel onderstreept worden door snelheidscontroles. Op punten waar van de weggebruiker een aanpassing van de snelheid wordt geëist die sterk afwijkt van het wegbeeld, kunnen plateaus een goede ondersteuning bieden. Voor de vormgeving wordt verwezen naar Bijlage D1. Bij wijziging van de situatie kunnen verkeersdeelnemers daarop worden geattendeerd door elektronische signaleringsborden.

Op 38 met verkeerslichten geregelde kruispunten buiten de bebouwde kom waar de maximumsnelheid van 80 km/h ter plaatse van een kruispunt is gereduceerd tot 50 km/h, is een reductie van -50 % gemeten van het aantal slachtofferongevallen (Fortuijn et al., 2005a).

2.3.3 Rotondes

In het oorspronkelijk concept van verkeerspleinen gingen de bedenkers uit van een verkeersafwikkeling geheel gebaseerd op invoegen, weven en uitvoegen (Eno, 1929 en Hénard, 1906). Na 1966 is met het instellen van de *offside priority* op de Engelse roundabouts (zie blz. 9 met voetnoot 34) en het onderzoek naar de voordelen daarvan (Blackmore, 1963), een veel beter concept voor de verkeersafwikkeling op rotondes duidelijk geworden: met lage snelheid naderen en dan voorrang verlenen, niet gebaseerd op parallel invoegen maar op het accepteren van een hiaat onder een duidelijke hoek[103].

In principe valt weven in een bocht buiten dit concept. Op moderne rotondes met een enkele strook ontbreekt dat ook. Maar toch werd dit in Engeland – en in navolging aanvankelijk ook elders – als onontkoombaar op meerstrooksrotondes geïntroduceerd. Met de turborotonde is weven niet noodzakelijk. Maar ook uitgaande van concentrische meerstrooksrotondes wordt – als gevolg van problemen in de praktijk – een vorm van spiraalmarkering[104] toegepast. De Amerikaanse rotondehandleiding (TRB, 2010) beveelt een vorm van spiraalbelijning zelfs voor concentrische meerstrooksrotondes als standaard aan. Zoals in paragraaf 2.4.3 zal blijken, voldoen concentrische meerstrooksrotondes op een aantal punten niet aan de voorwaarden voor een duurzaam veilige oplossing (Tabel 2.1.1): homogeniteit (de mogelijke doorrijsnelheid is te hoog), en herkenbaarheid (het weefgedrag van weggebruikers in een bocht is onvoldoende voorspelbaar[105]).

Uitgaande van het moderne rotondeconcept (zonder weven, met voorzieningen voor voldoende snelheidsreductie en maatregelen ter voorkoming van snijconflicten) kunnen drie verschillende vormen rotondes worden onderscheiden:

a. Minirotonde
b. Enkelstrooksrotonde
c. Turborotondes (zie hoofdstuk 3).

[103] Impliciet zijn dit twee principes van Duurzaam Veilig: homogeniteit (geen grote verschillen in snelheid en richting) en herkenbaarheid (voorspelbare manoeuvres, zie paragraaf 2.1.1).
[104] Hier is de term spiraalbelijning gebruikt als benadering voor een vorm van een belijning die uitwaaaiert.
[105] Ook doordat de ‘uitwaaiermarkering’ te eenvoudig kan worden genegeerd (Figuur 2.4-5).

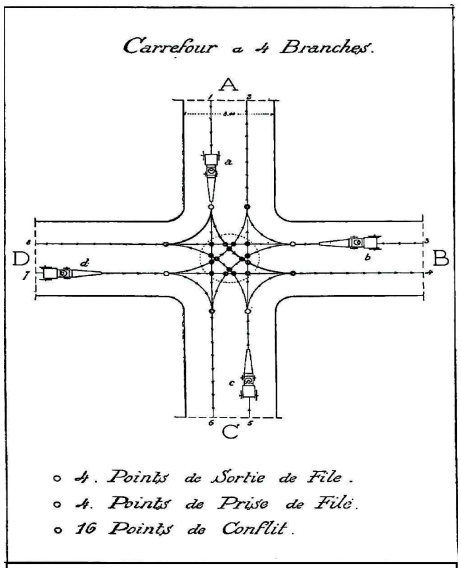
Daarnaast[106] zijn volledig met verkeerslichten geregelde verkeerspleinen als een afzonderlijke groep te onderscheiden (zie hoofdstuk 5).

In paragraaf 2.4 wordt een benadering gegeven, waarin alle – de auteur bekende – pleinen en rotondes een plaats krijgen. Hieronder volgt een summiere behandeling van het fenomeen 'rotonde', waarin een benadering vanuit de verkeerstaak centraal staat. Daarbij wordt de enkelstrooksrotonde als archetype van de moderne rotonde als referentiekader gebruikt.

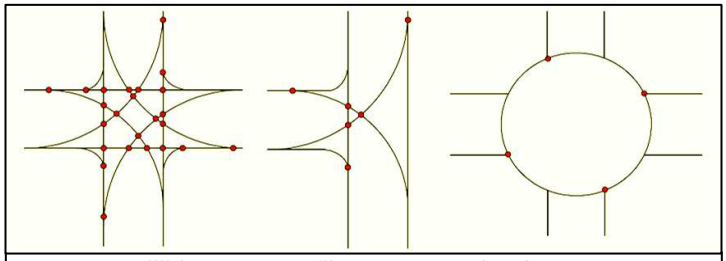
De enkelstrooksrotonde ontleent zijn veiligheid aan twee factoren:

1. aantal conflictpunten is veel minder dan op een viertakskruispunt;
2. snelheidsreductie.

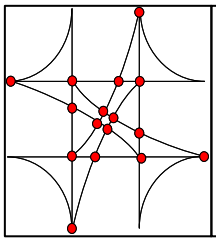
Ad 1. De bedenkers van het verkeersplein was het verschil in conflictpunten tussen een viertakskruispunt en een verkeersplein al duidelijk (bijvoorbeeld Hénard). Opmerkelijk is, dat Hénard tot een verschil van 16 conflictpunten tussen een viertakskruispunt en een rotonde komt (vergelijk Figuur 2.3-2 links met Figuur 1.1-4), terwijl dat in de factsheet *Rotondes* van de SWOV (2012) er 20 zijn. De oorzaak hiervan is, dat beide benaderingen in feite een menging inhouden van een conflictstroom- en conflictpuntbenadering[107]. Maar onverlet dit



Hénard (1906)



Een vergelijking van conflictpunten op basis van een stroombenadering (SWOV-Factsheet Rotondes)



16 conflictpunten viertakskruispunt in een benadering vergelijkbaar met die van de rotonde

Figuur 2.3-2 Vergelijking aantal conflictpunten tussen kruispunten en rotondes

[106] In deze opsomming ontbreekt de concentrische meerstrooksrotonde omdat die zowel qua homogeniteit als herkenbaarheid niet aan de kwaliteitseisen van Duurzaam Veilig voldoet.

[107] Het komt de vergelijkbaarheid ten goede in zo'n mengvorm in beide gevallen de oprijstromen in de verschillende richtingen bijeen te houden. In dat geval bedraagt het verschil 16-4= 12 conflictpunten, ervan uitgaande dat er geen afzonderlijke linksaf- en rechtsafstroken zijn. Uiteraard is dit een benadering die altijd discutabel is, omdat er impliciet een bepaalde vormgeving aan ten grondslag ligt. In het geval van een vormgeving als in Figuur 2.3-1 linker afbeelding, is bijvoorbeeld ook een aantal van 12 conflictpunten verdedigbaar, omdat zolang een verkeersstroom geen afzonderlijke strook gebruikt deze samenvalt met andere richtingen. Daarmee zou het verschil met een rotonde op 8 conflictpunten uitkomen.

discussiepunt, is het verschil in het aantal richtingen dat een bestuurder bij het oprijden van een kruispunt of rotonde in het oog moet houden, evident. In het Duurzaam Veilig-concept is dit een belangrijk aspect voor een goede herkenbaarheid van de verkeerssituatie.

Ad 2. De snelheidreductie is een minstens zo belangrijk veiligheidsaspect van een rotonde. In het Duurzaam Veilig-concept is dat een essentieel onderdeel van het homogeniteitsprincipe. Een snelheidsreductie van 50 tot ca 30 km/h betekent een aanmerkelijke reductie van de letaliteit van kwetsbare verkeersdeelnemers (zie Figuur 2.1-1). Op een enkelstrooksrotonde is een dergelijke snelheidsreductie haalbaar, indien de verschillende ontwerpelementen goed op elkaar zijn afgestemd.

De Nederlandse rotonde kenmerkt zich door radiaal aansluitende takken, zowel binnen de bebouwde kom (dat is ook in andere landen gebruikelijk) alsook buiten de bebouwde kom. Daarin is Nederland met Duitsland vrij uniek. Het effect hiervan is tweeërlei: het vergroot de uitbuiging van de rijcurve – en daarmee de snelheidsreductie – en het verbetert het zicht op de conflictpartij (derde principe Duurzaam Veilig). De voorwaarde voor het goed – d.w.z. veilig – functioneren daarvan is, dat bij nadering over vrij grote afstand het doorzicht wordt afgeschermd. Het rotondeschild op ooghoogte is daarvoor een onmisbaar element[108]. Overigens dient dat zo te worden uitgevoerd, dat het bij aanrijden 'vergevingsgezind' is (een principe van Duurzaam Veilig, zie paragraaf 2.1.1), d.w.z. in zijn geheel naar achteren klapt zonder in stukken te breken die de inzittenden kunnen verwonden (zie Bijlage D2).

Het ontwerpen van een rotonde is in feite een proces van het oplossen van dilemma's. Allereerst bestond bij de ontwikkeling van de moderne rotonde het dilemma tussen het beperken van de doorrijsnelheid en de berijdbaarheid voor grote voertuigen. Voor het bereiken van een lage doorrijsnelheid dient de rotondebaan zo smal mogelijk te zijn, maar grote voertuigen vragen om een voldoend brede rijbaan. De oplossing hiervoor zijn overrijdbaar verhoogde stroken, zowel rond het middeneiland als in de aansluitoksels[109]. De maatvoering van de overgang van rijbaan naar de overrijdbaar verhoogde strook (ook 'rammelstrook' genoemd) dient zo te zijn, dat banden van vrachtauto's zo min mogelijk wrijving ondervinden, terwijl personenautobestuurders ervan weerhouden worden met hoge snelheid er overheen te rijden. Hiermee is het oorspronkelijke dilemma tussen berijdbaarheid en veiligheid teruggebracht tot een afweging tussen veiligheid en de keuze van het voertuig dat geen gebruik hoeft te maken van de 'rammelstrook' (bijvoorbeeld de lijnbus).

Het dilemma tussen het bieden van voldoende capaciteit en veiligheid is complexer van aard. Een eerste maatregel om de capaciteit van enkelstrooksrotondes te verhogen is het verbreden van de middengeleider (Erné, 1995). Maar dit is van invloed op de uitbuiging van de snelste rijcurve, zodat de doorrijsnelheid hoger wordt. De optimale rijcurve wordt dan gevonden bij een iets grotere rotondestraal. In Bijlage D3 wordt hierop nader ingegaan.

---

[108] Uit o.a. afbeeldingen in literatuur blijkt, dat de essentiële rol die een rotondeschild op ooghoogte in het concept achter een radiaal aansluitende aanvoertakken buiten de bebouwde kom speelt, in onderzoek buiten beeld is gebleven (Spahn en Bäumler, 2007, Bild 5).

[109] Deze oplossing betekent dat bij rotondes met een buitenstraal groter dan 14,50 m de berijdbaarheid voor grote voertuigen geen enkel probleem hoeft op te leveren. Beperking van de doorrijsnelheid is in feite maatgevend voor de optimale buitenstraal van een rotonde.

Dit dilemma wordt nog groter wanneer meer dan één rijstrook nodig is op een rotonde. Zonder toepassing van spiraalbelijning gecombineerd met verhoogde rijstrookscheiding is dat probleem niet goed oplosbaar. Zie hoofdstuk 3.

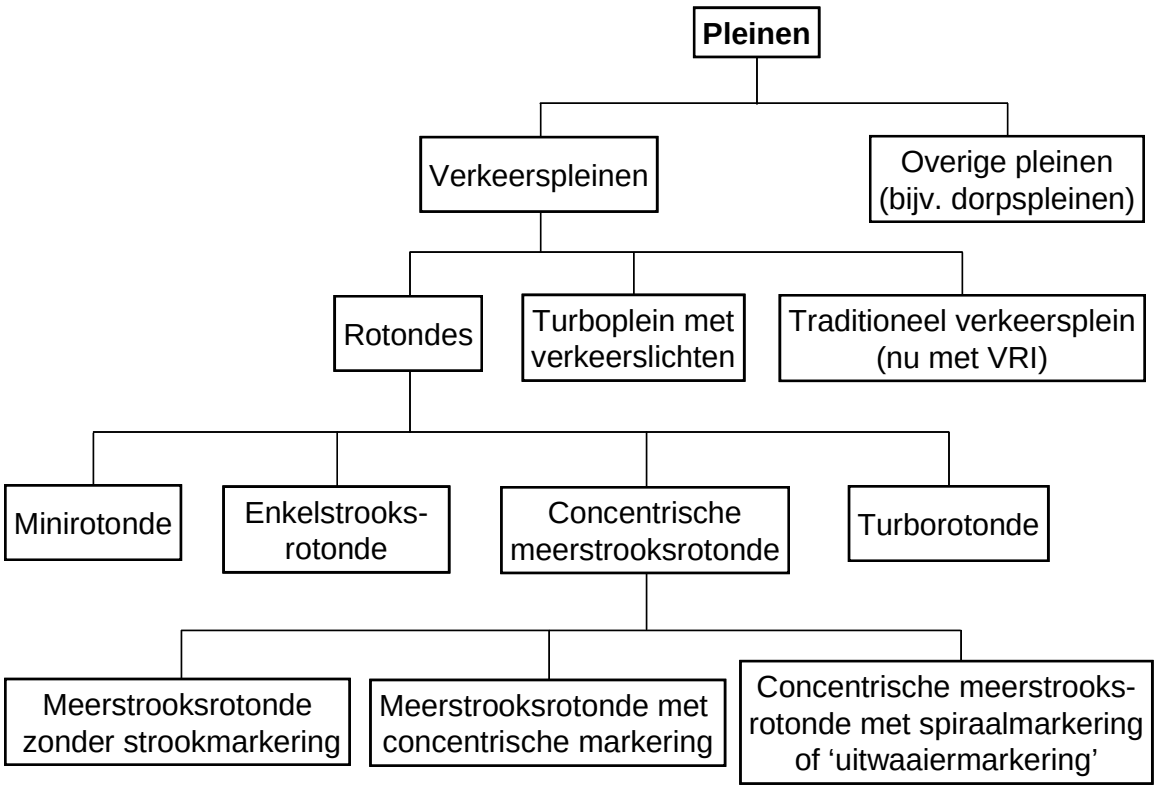
2.4 Verschillende typen pleinen en rotondes

2.4.1 Indeling van pleinen en rotondes

De variatie in verkeerspleinen en rotondes is wereldwijd zeer groot. In Figuur 2.4-1 zijn de verschillende begrippen met betrekking tot pleinen en rotondes in een hiërarchisch verband geplaatst.

Verkeerspleinen onderscheiden zich van de overige pleinen door een rondgaande verkeerscirculatie in één richting. Het onderscheid tussen rotondes en de oude verkeerspleinen is niet in alle landen gelijk. Het kenmerkende van de Nederlandse rotonde is, dat:

- het verkeer zich in rondgaande beweging, tegen de wijzers van de klok in[110], afwikkelt (kenmerk van een verkeersplein);
- het verkeer op het plein voorrang heeft (kenmerk dat de rotonde internationaal met de 'roundabout' gemeen heeft);
- de takken radiaal aansluiten (zowel de aanvoer- als de afvoertakken). Dit is een kenmerk dat uniek is voor de Nederlandse *definitie* van de rotonde.



Figuur 2.4-1 Classificering van pleinen en rotondes

[110] In landen waar het verkeer rechts rijdt. In Engeland, Zuid-Afrika en Australië bijvoorbeeld, waar het verkeer links rijdt, circuleert het verkeer op een rotonde met de wijzers van de klok mee.

Op basis van het geometrisch ontwerp zijn vier[111] hoofdtypen rotondes te onderscheiden:

a. Minirotonde, die zich onderscheidt door een volkomen overrijdbaar middeneiland.
b. Enkelstrooksrotonde, die evenals de minirotonde een rondgaande baan heeft ter breedte van één rijstrook, maar met een niet-overrijdbaar middeneiland.
c. Concentrische meerstrooksrotonde, die identiek is aan een enkelstrooksrotonde, maar de rotondebaan heeft een breedte van meer dan één rijstrook.
d. Turborotonde, die zich van de concentrische meerstrooksrotonde niet alleen onderscheidt door een spiraalvormig verloop van de rondemarkering, maar ook door een geometrisch ontwerp dat geheel op die spiraalvorm is afgestemd (met behulp van cirkels met verspringende middelpunten). Voor de ontwerper is die vorm complexer, maar voor de automobilist vraagt het minder stuurbewegingen om de markering te volgen dan een concentrische rotonde die van een spiraalmarkering wordt voorzien. Verhoogde strookscheidingen vervullen dan ook op een turborotonde min of meer een vanzelfsprekende rijstrookgeleiding, waarmee zowel hoge snelheden (afsnijden van de uitbuiging), alsook weefbewegingen c.q. snijmanoeuvres worden voorkomen.

Concentrische meerstrooksrotondes kunnen onderling weer verschillen door de wijze waarop de rijstroken op de rotonde worden gemarkeerd: in het geheel niet, concentrisch of spiraalvormig. Het idee van een concentrische meerstrooksrotonde zonder markering is uit Engeland afkomstig. Dit moet dan ook gezien worden tegen de achtergrond van de typisch Engelse verkeersregels[112]. In Nederland werd oorspronkelijk de tweestrooksrotonde met concentrische belijning aanbevolen (CROW, 1998, hoofdstuk 7). Wanneer een rotonde ondanks de spiraalvormige strookmarkering qua geometrisch ontwerp een cirkelvormige basis heeft, wordt die door de auteur tot deze groep gerekend. Bijvoorbeeld wordt de meerstrooksrotonde, die in de nieuwe Amerikaanse rotondehandleiding (TRB, 2010) is voorzien van een gedeeltelijk naar buiten gerichte strookmarkering (‘*uitwaaiermarkering*’), in het schema van Figuur 2.4-1 ingedeeld bij de concentrische meerstrooksrotonde[113]. Aan de ene kant zullen weggebruikers ook die rotonde als een soort turborotonde ervaren, maar tegelijkertijd ook gebruik maken van de grotere vrijheid om van strook te wisselen, met snijconflicten en hogere doorrijsnelheden tot gevolg.

In de naamgeving zijn in Nederland rotondes een specifieke groep binnen de categorie verkeerspleinen met als onderscheidend kenmerk dat de takken niet tangentieel maar radiaal aansluiten. Bij de opkomst van de rotonde (begin jaren 90) bestond het onderscheid ook in de voorrangsregeling, maar dat onderscheid is er thans niet meer: op praktisch alle verkeerspleinen heeft het pleinverkeer voorrang, terwijl het merendeel van de traditionele verkeerpleinen thans geregeld wordt met verkeerslichten en voorzien is van spiraalbelijning.

---

[111] In Engeland onderscheidt men ook de ‘Grade Separated Roundabouts’ (DFT, 2007); maar dat één van de takken naar een weg voert die ongelijkvloers kruist, is voor de rotondevorm zelf niet essentieel .

[112] Bij het verlaten van de Engelse meerstrooksrotonde kan niemand recht op voorrang laten gelden. Vergelijk The Highway Code 2007: ‘**General rules, 159** Before moving of … Move off only when it is safe to do so’ en ‘**Roundabouts, 187** In all cases watch out for and give plenty of room to… traffic crossing in front of you on the roundabout, especially vehicles intending to leave by the next exit’.

[113] Zowel de aanduiding ‘*spiraalbelijning*’ als ‘*uitwaaiermarkering*’ (in het Engels zou dat ‘*fan-out marking’* kunnen zijn**)** zijn bruikbaar. Wellicht verdient het woord ‘uitwaaiermarkering’ de voorkeur omdat de begrippen ‘concentrisch’ en ‘spiraal’ elkaar in feite uitsluiten.

Turbopleinen zijn ontworpen om met verkeerslichten geregeld te worden. Ze onderscheiden zich in twee opzichten van traditionele verkeerspleinen:

- de naderingstakken sluiten radiaal aan (en niet tangentieel);
- op het plein zelf wordt niet van strook gewisseld, terwijl in principe elke rijstrook op het plein aan één richting is toebedeeld (er zijn ook traditionele verkeerspleinen met verkeerslichten die dit kenmerk hebben, maar dat is meer uitzondering dan regel).

Het verschil met de turborotonde bestaat erin, dat (afgezien van het aantal rijstroken) de afvoertakken niet radiaal maar tangentieel aansluiten en de rijstroken op een turboplein bestemd zijn voor een enkele richting. Op een volledige turborotonde is er per segment altijd één strook die naar meer dan één afrit voert[114]. Beide verschillen zijn essentieel voor het optimaal toepassen van een verkeerslichtenregeling (anders dan een rotonde-doseerinstallatie).

2.4.2 Indelingen rotondes in Nederland

In Nederland vindt de indeling van rotondes vanuit verschillende aspecten plaats volgens CROW-publicatie 126 *Eenheid in rotondes* (CROW, 1998), later aangevuld met publicatie 257 *Turborotondes* (CROW, 2008):

- *Maatvoering enkelstrooksrotonde binnen of buiten de bebouwde kom:*
  - binnen de bebouwde kom is de aanbevolen maat voor de buitenstraal van de enkelstrooksrotonde 16 m en de binnenstraal 10,50 m;
  - buiten de bebouwde kom is de aanbevolen buitenstraal 18 m en binnenstraal 12,75 m. Provinciale wegbeheerders maken ze veelal iets ruimer. Zuid-Holland bijvoorbeeld past een buitenstraal van 18,70 m en een binnenstraal 13,50 m toe met een centraal overrijdbaar verhoogde strook van 4 m breed (afgestemd op voertuigen van 27 m). Zie Bijlage D.4.
- *Afwikkeling fietsverkeer*
  - rotonde met een gemengde verkeersafwikkeling (uit veiligheidsoverwegingen alleen bij lage intensiteiten toepasbaar, Bijlage D.6.2);
  - rotonde met vrijliggende fietspaden in de voorrang (in CROW-publicatie 126 aanbevolen voor binnen de bebouwde kom);
  - rotonde met vrijliggende fietspaden uit de voorrang (veiligste oplossing – Bijlage D.6.2– , in CROW-publicatie 126 aanbevolen buiten de bebouwde kom).
- *Aantal en tracering rijstroken*
  - enkelstrooksrotonde
  - tweestrooksrotonde (concentrisch: in publicatie 126 standaard, in publicatie 257 ontraden);
  - turborotonde (sinds publicatie 257 de standaard meerstrooksrotonde).
- *Bijzondere verschijningsvormen*, zoals
  - by-passrotonde;
  - ovonde;
  - kluifrotonde.

[114] Alleen bij partiële turborotondes is dat niet het geval.

2.4.3 Indeling van de FHWA/TRB van pleinen en rotondes

De Federal Highway Administration van het U.S. Department of Transportation maakt in de publicatie *Roundabouts, An Informational Guide (FHWA, 2000)* onderscheid tussen drie begrippen:

Roundabouts, die het meest op onze moderne rotondes lijken. Ze kenmerken zich door middengeleiders in de aansluitende takken en zijn verder zo vormgegeven dat de snelheid tot beneden de 50 km/h wordt gereduceerd. Het radiaal aansluiten van de zijtakken is niet als zodanig in de definitie opgenomen. Als gevolg daarvan wijkt het geometrisch ontwerp in de Angelsaksische landen af van het Nederlandse ontwerpprincipe, met als gevolg dat de snelheden hoger zijn. Vooral voor het langzame verkeer is dat minder veilig.

Rotaries or traffic circles, die overeenkomen met de 'oude' of 'traditionele' verkeerspleinen in Nederland.

Neighborhood traffic circles, die worden gebouwd om op kruispunten de snelheid te verminderen of om esthetische redenen. Het verkeer hoeft zich niet (allemaal) in een rondgaande cirkel of in één richting af te wikkelen, parkeren kan er mogelijk zijn, maar ook kunnen middengeleiders ontbreken. In het Nederlands vallen ze onder de algemene aanduiding 'pleinen' en dan met name in de categorie 'overige pleinen'.

In de eerste editie uit 2000 worden verkeerspleinen met verkeerslichten nog niet als een afzonderlijke categorie aangeduid[115].

Ook de rotondes kunnen weer onderscheiden worden in verschillende categorieën. De editie uit 2000 geeft de indeling die in Tabel 2.4.1 is weergegeven.

Tabel 2.4.1 Vergelijking van categorieën Roundabouts FHWA 2000

Mini-Roundabout	Urban Compact	Urban Single-Lane	Urban Double-Lane	Rural Single-Lane	Rural Double-Lane
Recommended maximum entry design speed					
25 km/h	25 km/h	35 km/h	40 km/h	40 km/h	50 km/h
Maximum number of entering lanes per approach					
1	1	1	2	1	2+
Typical inscribed circle diameter[1)]					
13 m to 25 m	25 m to 30 m	30 m to 40 m	45 m to 55 m	35 m to 40 m	55 m to 60 m
Splitter island treatment					
Raised if possible, crosswalk cut if raised	Raised, with crosswalk cut	Raised, with crosswalk cut	Raised, with crosswalk cut	Raised and extended, with crosswalk cut	Raised and extended, with crosswalk cut
Typical daily service volumes on 4-leg roundabout (veh / day)					
10.000	15.000	20.000	Verwezen wordt naar capaciteit-berekeningen	20.000	Verwezen wordt naar capaciteit-berekeningen

In het basisontwerp volgt de Amerikaanse handleiding het in Engeland gebruikelijke principe om zowel bij de rotonde-ingang als bij de rotonde-uitgang de weg mee te laten buigen. Alleen wordt in een voetnoot bij de rotonde-diameter opgemerkt, dat de kleine rotonde-diameters

[115] In de eerste editie uit 2000 werden de begrippen 'signalized roundabouts' en 'fully signalized rotary' onder het kopje *8.1.3 Full signalization of the circulatory roadway* nog naast elkaar gebruikt.

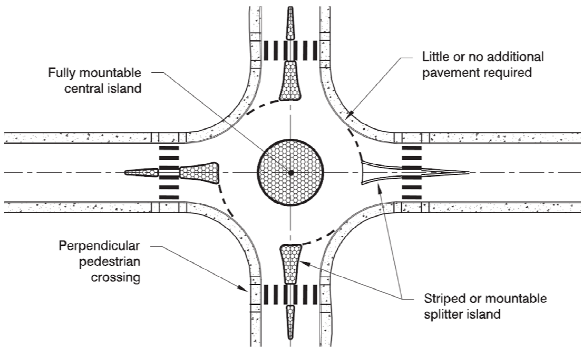
alleen verantwoord zijn, wanneer er niet meer dan vier takken op de rotonde aansluiten, met een onderlinge hoek van 90°. In 2010 is de tweede editie van deze Amerikaanse handleiding verschenen: *NCHRP Report 672 Roundabouts: An Informational Guide, Second Edition (TRB, 2010).* Hierin wordt (op blz.1-5) de oorspronkelijke tweede categorie *Rotaries, or traffic circles* gesplitst in *Rotaries* en *Signalized traffic circles*, zodat er in totaal vier categorieën ontstaan:

1. Roundabouts
2. Rotaries or old traffic circles
3. Signalized traffic circles
4. Neighborhood traffic circles.

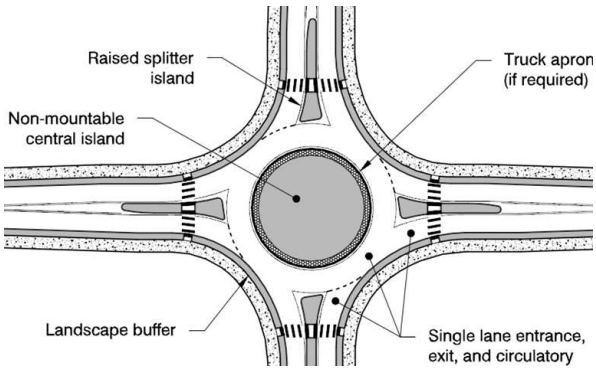
In deze tweede editie is het aantal typen rotondes beperkt tot drie: *Mini-Roundabout, Single-Lane Roundabout* en *Multilane Roundabout.* De aanduiding *Signalized Roundabout* wordt niet meer gebruikt. In Engeland wordt *Signalised Roundabout* nog wel gebruikt (DTF, 2003 en 2007).

Tabel 2.4.2 Vergelijking van categorieën Roundabouts TRB 2010

Design Element	Mini- Roundabout	Single-Lane Roundabout	Multilane Roundabout
Desirable maximum entry design speed	25 to 30 km/h	30 to 40 km/h	40 to 50 km/h
Maximum number of entering lanes per approach	1	1	2+
Typical inscribed circle diameter[1)]	13 to 27 m	27 to 55 m	46 to 91 m
Splitter island treatment	Fully traversable	Raised (may have traversable apron)	Raised (may have traversable apron)
Typical daily service volumes on 4-leg roundabout (veh / day)	Up to approximately 15.000	Up to approximately 25.000	Up to approximately 45.000 for two-lane roundabout



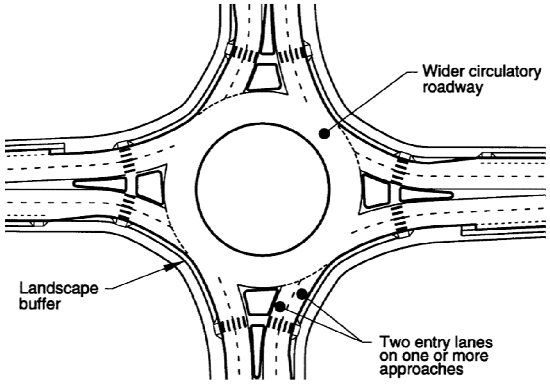
Figuur 2.4-2 Features of Typical Mini-Roundabout *(TRB,2010, Exhibit 1-10)*



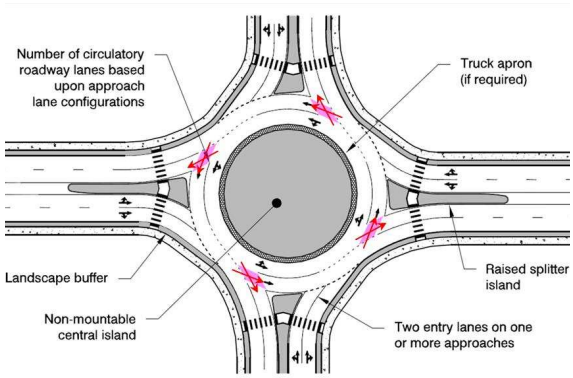
Figuur 2.4-3 Features of Typical Single-Lane Roundabout *(TRB, 2010, Exhibit 1-12)*

Op de *double-lane roundabout* is in de editie uit 2000 op de rotonde zelf geen belijning getekend. Alleen de aanvoertakken worden in rijstroken verdeeld. In de tweede editie is dit

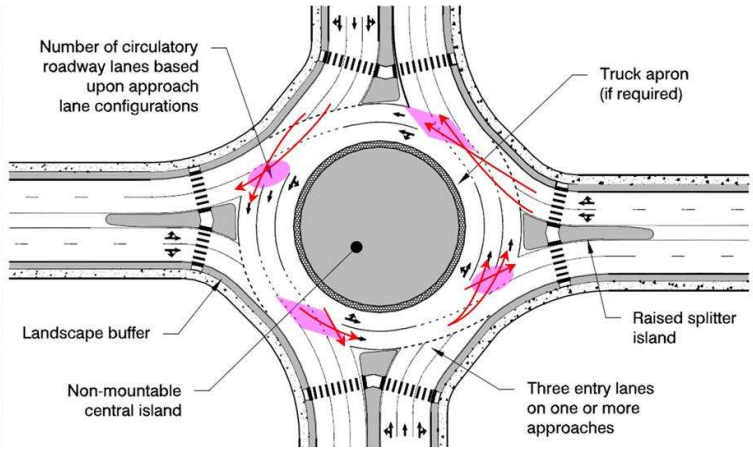
uitgangspunt losgelaten. Opvallend is dat daarin alle *multilane roundabouts* van een spiraalvormige –of beter: uitwaaier– belijning zijn voorzien[116].



Figuur 2.4-4 Typical urban double-lane roundabout *(FHWA, 2000, Exhibit 1-11)*



Figuur 2.4-5 Features of Typical Two-lane Roundabout *(TRB, 2010, Exhibit 1-14)*



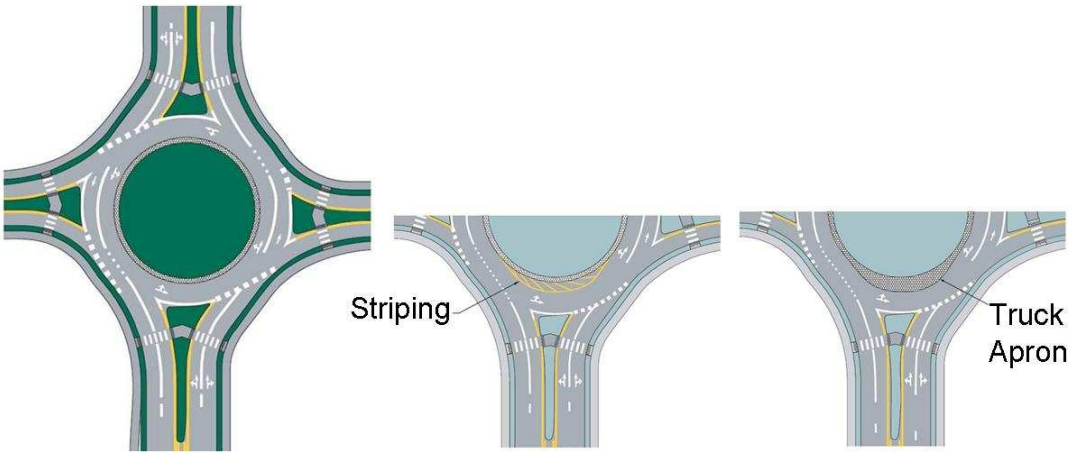
Figuur 2.4-6 Features of Typical Three-lane Roundabout *(TRB, 2010, Exhibit 1-15)*

De ontwerpen van Figuur 2.4-5 en Figuur 2.4-6 gaan ervan uit, dat bestuurders de pijlmarkering precies opvolgen. Omdat in deze ontwerpen overrijdbaar verhoogde strookscheidingen (mountable raised lane dividers) ontbreken, zullen er in de praktijk snijconflicten optreden. Die kunnen optreden zowel tussen voertuigen die oprijden (waarvan de rechtsrijdende de rotonde blijft volgen terwijl de links rijdende toch afslaat), als wel tussen voertuigen die zich al op de rotonde bevinden (waarvan de rechts rijdende toch de rotonde blijft volgen). Die zijn door de auteur in rood aangegeven.

Behalve de ontwerpen van Figuur 2.4-4 en Figuur 2.4-6 worden in de Amerikaanse handleiding ook afbeeldingen vertoont waarin op de zijrichting één strook en op de hoofdrichting twee stroken de rotonde verlaten. In Figuur 2.4-7 worden de gevolgen voor de rijcurven van een spiraalvormige markering op een concentrisch rotonde duidelijk: het aantal stuurbewegingen neemt met 50 %[117] toe.

[116] Het principe van de oplossing van Figuur 2.4-5 heeft de auteur voor het eerst aangetroffen in de Australische (QDRM) *Road Planning and Design Manual*, Chapter 14 *Roundabouts*, uit 2002. In feite is de strookmarkering opgebouwd uit concentrische cirkels. Alleen heeft de buitenste rotondebaan een markering gekregen die op alle takken de rotonde verlaat. Het strookgebruik van degenen die linksafslaan is onzeker, temeer daar een relatief lange onderbroken markering nodig is.

[117] Zie ***Figuur 3.3-2***.



Figuur 2.4-7 Varianten verloop rotondestroken Amerikaanse rotondehandleiding
(TRB, 2010, Exhibit A-3, A-4 en A-5)

Een kenmerk van deze oplossingen is verder dat de aanvoertak niet radiaal maar tangentieel aansluit[118].

2.5 Conclusies

Het Duurzaam Veilig-concept biedt een goede ingang voor het classificeren van kruispunten, gelet op de netwerkfunctie. In relatie daarmee kunnen kruispunten meer in detail worden ingedeeld naar vormgeving, uitgaande van regelgeving en verkeerstaak. Gelet op de functionaliteit van wegen – het eerste hoofdprincipe van Duurzaam Veilig – vormen rotondes een integraal onderdeel van gebiedsontsluitingswegen.

Het Duurzaam Veilig-concept kan ook worden gehanteerd voor de beoordeling van de veiligheidpotenties van de detaillering van verkeersoplossingen. Conflictsnelheid is daarbij een belangrijk beoordelingscriterium. In de verkeerspsychologie is snelheid belangrijk voor de beschikbare tijd voor de informatieverwerkingcyclus waarnemen – beslissen – handelen, die grote invloed heeft op de foutkans. In het Duurzaam Veilig-concept komen meer aspecten van snelheid in het vizier. Reductie van snelheidsverschillen tussen conflicterende partijen is in dat concept een essentieel onderdeel van het streven naar homogeniteit in verkeersoplossingen. Bij standaardkruispunten leidt dat tot de introductie van plateaus. Bij rotondes is de uitbuiging van de doorrijcurve een belangrijk kenmerk.

[118] De achtergrond daarvan is al verwoord in een Australische richtlijn, waarin wordt gesteld: "International studies have shown that increasing the vehicle path curvature decreases the relative speed between entering and circulating vehicles and thus usually results in decreases in the entering-circulating and exiting-circulating vehicle crash rates. However, at multilane roundabouts, increasing vehicle path curvature creates greater side friction between adjacent traffic streams and can result in more vehicles cutting across lanes and higher potential for sideswipe collisions" (QDRM, 1998). Dit is ook geciteerd in *Roundabouts: An Informational Guide* (FHWA, 2000, subsection 6.2.1.2, p.132) en in de tweede editie is dit herhaald (TRB 2010, section 6.2.1, p. 6-10). Daarom wordt gekozen voor een uitbuiging van de aanvoertak, waardoor een tangentiële aansluitvorm ontstaat, afgeleid van de Britse roundabout. In de ASSHTO richtlijn *Geometric Design of Highways and Streets* (2001) wordt zonder meer de aanbeveling gedaan om aan- en afvoertakken tangentieel aan te sluiten als de capaciteit daarom vraagt (Exhibit 9-17 p. 572).

Al vroeg – sinds 1906 – heeft de beschouwing van het aantal en de aard van potentiële conflictpunten in de verkeerskundige ontwerptechniek een rol gespeeld. Hoewel de werkelijke betekenis daarvan voor de veiligheid veel minder duidelijk is dan die van snelheid, sluit een dergelijke beschouwing kennelijk dicht aan bij de geometrische ontwerptechniek. Het grote verschil tussen het aantal richtingen dat een bestuurder in het oog moet houden bij het oprijden van een moderne enkelstrooks rotonde en een traditioneel kruispunt is evident. Op concentrische tweestrooksrotondes worden echter weer nieuwe ontmoetingspunten tussen conflicterende partijen geïntroduceerd die daarbij ook nog moeilijk herkenbaar zijn.

Voor het indelen van rotondes kunnen verschillende criteria worden gehanteerd. De tracering en indeling van de rotondebaan in combinatie met de wijze waarop de takken aansluiten is een belangrijk classificeringcriterium (Figuur 2.4-1). Beoordeeld vanuit de Duurzaam Veilig-optiek voldoen de concentrische meerstrooksrotondes niet aan de te stellen eisen. Dat gegeven vormt de achtergrond van de uitdaging die met de ontwikkeling van de turborotonde is aangegaan.

3 Turborotonde

Concentrische tweestrooksrotondes hebben weliswaar een hogere capaciteit dan de enkelstrooksrotonde, maar hebben als nadeel een hogere doorrijsnelheid. Ook introduceren ze via een achterdeur weer het weven op de rotonde, met als gevolg een toename van het aantal aanrijdingen (paragraaf 3.1). Passeerbaanrotondes kennen dit bezwaar niet, maar zijn beperkt toepasbaar (paragraaf 3.2). Vanwege deze bezwaren heeft de auteur in 1996 de turborotonde ontwikkeld (paragraaf 3.3). Deze rotonde voldoet aan de volgende randvoorwaarden:

- niet weven op de rotonde;
- aan niet meer dan twee stroken voorrang geven;
- doorrijsnelheden laag.

Deze randvoorwaarden zijn vertaald in een tiental ontwerpkenmerken.

In paragraaf 3.4 worden de verschillende hoofdvarianten van de turborotonde behandeld, die voldoen aan deze uitgangspunten en hun toepassing vinden afhankelijk van het belastingpatroon. Geometrisch verschillen ze in de booglengte waarover de rijbaan/-strook de breedte van één rijbaan/ -strook opschuift (de spoed van de spiraal) en de rijstrookindeling.

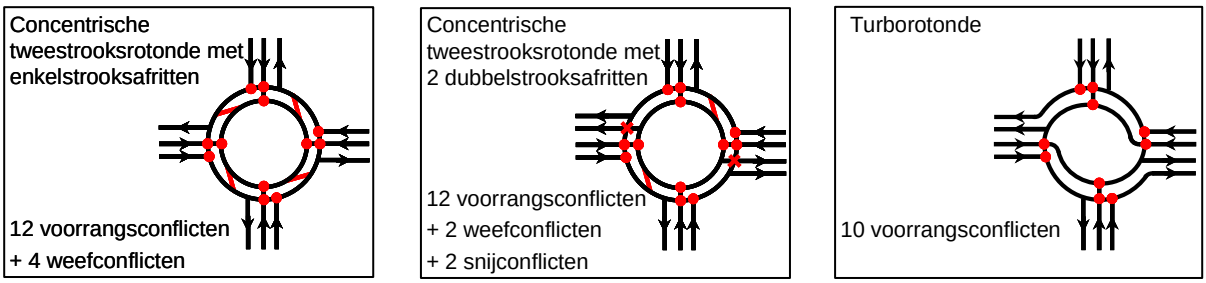
De ontwerpmethodiek wordt beschreven in paragraaf 3.5. Belangrijke ontwerpelementen zijn het ‘turboblock’ – bepalend voor de spoed van de spiraalvorm – (paragraaf 3.5.2) en de overrijdbaar verhoogde strookscheiding (paragraaf 3.5.4).

Het principe van de turborotonde maakt het noodzakelijk dat bestuurders van motorvoertuigen al op de naderingstak de juiste rijstrook kiezen. In paragraaf 3.6 wordt de ontwikkeling van de daarvoor benodigde bewegwijzering en pijlmarkering behandeld.

3.1 Achtergrond

Concentrische tweestrooksrototondes worden in veel landen toegepast. Maar met zeer verschillende aanbevelingen. In par. 2.4.2 zijn de oplossingen die in Australië en de USA worden toegepast, aan de orde gekomen. Daar wordt gekozen voor een tangentiële aansluitvorm om overlap van de doorrijcurve van auto's op de buitenste en binnenste rijstrook (zoals in beeld gebracht in de Bijlage Figuur D.3-3) zoveel mogelijk te voorkomen. Maar dit impliceert wel een ruimere doorrijcurve, ondanks dat in alle genoemde publicaties wordt gesteld dat de daarbij behorende voertuigsnelheden door de rotonde het meest kritische ontwerpaspect is[119].
Naast bovengenoemd dilemma van overlappende doorrijcurves, heeft een concentrische tweestrooksrotonde, al dan niet voorzien van concentrische markering, nog een ander bezwaar. De berijder van de linker aanvoerstrook moet op de rotonde op zeer korte afstand weven om de rotonde te kunnen verlaten. Met een 'uitwaaiermarkering' zou dit voorkomen worden als autobestuurders de belijning zouden volgen, wat in veel gevallen moet worden betwijfeld (zie Figuur 2.4-5, Figuur 2.4-6 en Bijlage Figuur D.3-4).
In Nederland heeft het CROW in 1998 *Eenheid in rotondes* gepubliceerd. Daar is in bovengenoemd dilemma een andere keuze gemaakt: de takken sluiten radiaal aan. Het hoge fietsgebruik in Nederland is hier niet vreemd aan. De afvoertakken bestaan uit slechts één rijstrook. Verder is de rotondebaan van markering voorzien.

Bij toepassing van twee afvoerstroken wordt de conflictsituatie nog problematischer: er ontstaat een snijconflict als de berijder van de buitenste rotondestrook toch de rotonde vervolgt. Uit het verloop van de concentrische rotondebaan is niet af te leiden dat dit niet de bedoeling is. In Figuur 3.1-1 zijn de verschillende conflicttypen in beeld gebracht, onderscheiden naar rotondetype.



Figuur 3.1-1 Vergelijking conflictpunten van concentrische tweestrooksrotondes met turborotonde

[119] FHWA (2000): "Because it has profound impacts on safety, achieving appropriate vehicular speeds through the roundabout is the most critical design objective. A well-designed roundabout reduces the relative speeds between conflicting traffic streams by requiring vehicles to negotiate the roundabout along a curved path." (p. 132).
ASSHTO (2001): "…appropriate vehicular speeds through the roundabout being 'the most critical design objective'."(p. 580).
TRB (2010): "Achieving appropriate vehicular speeds for entering and traveling through the roundabout is a critical design objective as it has profound impacts on safety of all users; it also makes roundabouts easier to use and more comfortable for pedestrians and bicyclists. A well-designed roundabout reduces vehicle speeds upon entry and achieves consistency in the relative speeds between conflicting traffic streams by requiring vehicles to negotiate the roundabout along a curved path." (p. 6-9).

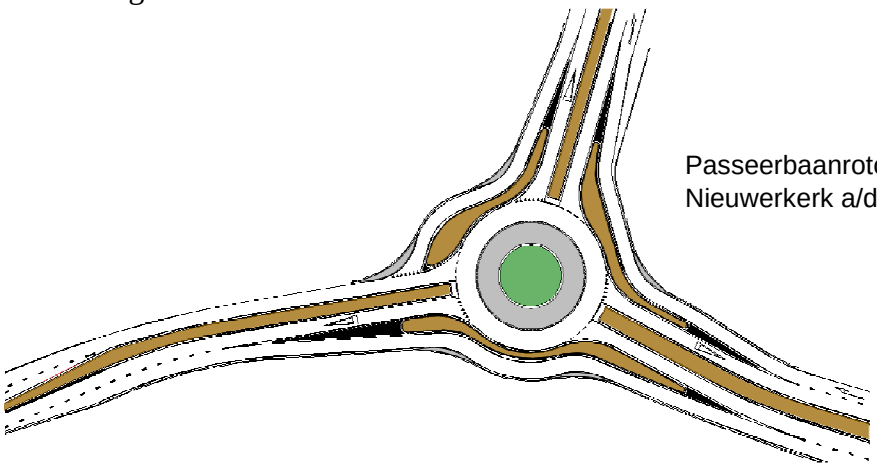
Geconstateerd moet worden, dat op de concentrische tweestrooksrotonde in feite één van de hoofdbezwaren van het oude verkeersplein weer via een achterdeur wordt binnengehaald: de noodzaak tot weven in een bocht. Gelukkig maakt de gewijzigde voorrangsregeling het mogelijk om de moderne concentrische tweestrooksrotonde kleiner uit te voeren (buitendiameter < 75 m). Hierdoor zullen de rijsnelheden over het algemeen lager zijn. Zo blijft de concentrische tweestrooksrotonde wel in het voordeel t.o.v. het oude verkeersplein. Niettemin is het sterke punt van de eenvoudige conflictafhandeling die de moderne enkelstrooksrotonde kenmerkt, verdwenen. Vanwege dit bezwaar heeft de auteur een oplossing van het capaciteitstekort van de enkelstrooksrotonde in een andere richting gezocht.

3.2 Passeerbaanrotondes

Het ligt voor de hand om allereerst de oplossing van het capaciteitstekort te zoeken in het toevoegen van passeerbanen, ook wel by-passes genoemd. Dan wordt de enkelstrooksrotonde intact gelaten, maar wordt vanaf één of meer zwaar belaste takken voor de rechtsafbeweging een extra baan toegevoegd, buiten de rotonde om. In feite is dit dus geen meerstrooksrotonde.

In Engeland worden rotondes met by-passes al langer toegepast. In Nederland is één van de eerste voorbeelden van by-passrotondes de ‘ovonde’ over de A27 te Bilthoven.

Een punt van aandacht vormt de uitmonding van de by-pass. Als deze niet over ca. 100 m als een afzonderlijke strook doorloopt, moet gekozen worden voor een duidelijke haakse aansluiting[120].



Passeerbaanrotonde N219/A20 te Nieuwerkerk a/d IJssel

Figuur 3.2-1 Passeerbaanrotonde (met twee typen uitmondingen)

Voor een drietaks kruispunt is een passeerbaanrotonde een goede oplossing, maar op viertakskruispunten is hij lang niet voor alle verkeersbelastingen geschikt. Daarom is gezocht naar een oplossing om rotondes met twee stroken zó uit te voeren, dat weven op de rotonde niet alleen niet nodig is maar ook achterwege gelaten wordt.

[120] De uitmondingen in de figuren 24c t/m 24e uit CROW-publicatie 126 laten een veel te scheve hoek zien, wat nadelig is voor het zicht op het verkeer waaraan voorrang moet worden verleend.

3.3 Kenmerken turborotonde

De uitdaging is het ontwikkelen van een rotonde met een hogere capaciteit dan de enkelstrooksrotonde en de passeerbaanrotonde, maar met dezelfde veiligheidskenmerken als de enkelstrooksrotonde. De randvoorwaarden waaraan deze rotonde moet voldoen, zijn:

- op de rotonde niet weven;
- aan niet meer dan twee stroken voorrang geven;
- doorrijsnelheden laag.

Het antwoord op deze uitdaging is de *turborotonde*. Dit idee is vastgelegd in Octrooinummer 1005703 (Bureau voor de Industriële Eigendom, 1998) [121].

Overzicht kenmerken

De turborotonde heeft de volgende kenmerken:

a) ten minste vanaf één tak moet voorrang worden verleend aan meer dan één rijstrook;
b) maar vanaf geen enkele tak hoeft aan meer dan twee rotondestroken voorrang te worden verleend;
c) weef- of snijconflicten ontbreken door een consequent toegepaste spiraalbelijning;
d) onnodige stuurbewegingen worden voorkomen door een soepel verloop van de spiraalbelijning;
e) op elk segment is een keuzestrook aanwezig, waarop het verkeer kan kiezen om de rotonde te verlaten of te vervolgen;
f) ten minste twee afvoertakken bestaan uit twee rijstroken;
g) overrijdbaar verhoogde baanscheidingen voorkomen het afsnijden van de uitbuiging;
h) kleine rotonde-diameter;
i) de takken sluiten radiaal op de rotonde aan;
j) overrijdbare stroken bieden voldoende ruimte aan lange voertuigen om de rotonde te berijden.

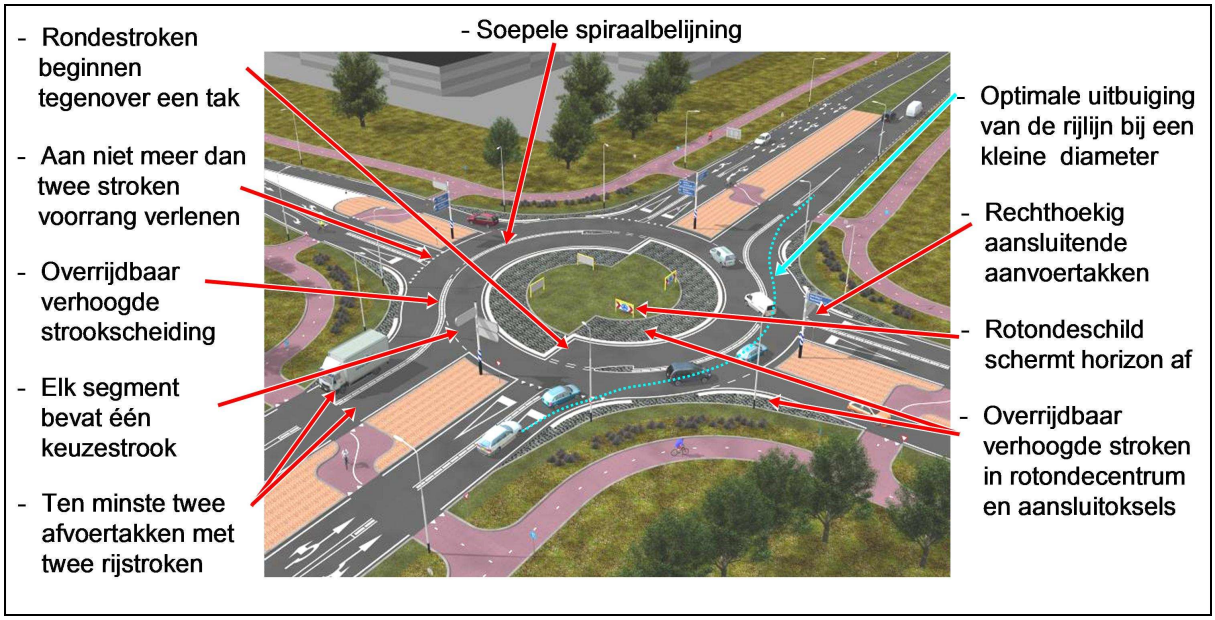
De kenmerken a) t/m d) zijn de basiskenmerken. Als aan één daarvan niet is voldaan, is er geen sprake van een turborotonde. Als aan de kenmerken e) en f) niet wordt voldaan gaat het om een partiële turborotonde. De kenmerken g) en h) zijn van groot belang voor het realiseren van het veiligheidsniveau dat potentieel met een turborotonde kan worden bereikt, terwijl de turborotonde kenmerken i) en j) gemeen heeft met de Nederlandse enkelstrooksrotonde.

In Figuur 3.3-1 is dit in beeld gebracht. Op het belang van elk van de genoemde kenmerken wordt hierna ingegaan. Op basis van deze uitgangspunten kunnen verschillende rotondevormen ontworpen worden (paragraaf 3.4). Eén van die vormen werd aangeduid met de naam ‘turborotonde’, als een verkorte naam voor ‘turbine rotonde’. In de pers sloeg deze naam echter zodanig aan, dat nu al deze vormen worden aangeduid met het begrip ‘turborotonde’. De vorm die aanvankelijk deze naam droeg, wordt daarom nu aangeduid met de naam ‘basis turborotonde’. Als niet aan de kenmerken e) en f) wordt voldaan, is er sprake van een partiële turborotonde (CROW publicatie 257, 2008, p.13).

[121] In de Nederlandse verkeerskundige vakliteratuur is dit concept, met een verkenning van de capaciteit, voor het eerst gepubliceerd in 1997 (Fortuijn en Harte, 1997).

Ad a) Aan meer dan één rijstrook voorrang verlenen vanaf ten minste één tak

Kenmerk a) lijkt vanzelfsprekend. Als hieraan niet is voldaan, is er geen sprake van een turborotonde (CROW, 2008, p.13), maar bijvoorbeeld van een alternatief voor een by-passrotonde. In het verleden is dat rotondetype ook wel wiekrotonde genoemd (Fortuijn & Harte, 1997).



Figuur 3.3-1 Karakteristieke kenmerken turborotondes

Ad b) Aan niet meer twee rotondestroken voorrang verlenen

Aan meer dan twee rotondestroken voorrang verlenen is voor de verkeersdeelnemer complex. Erné (1994a) noemt dit als één van de mogelijke factoren voor het hoge aantal ongevallen op het oude verkeersplein in Venlo (met pleinverkeer in de voorrang). Ook is de effectiviteit van een uitbreiding van twee naar drie rotondestroken veel kleiner dan van één naar twee: om naar de binnenste rotondestrook te kunnen oprijden moet in drie stroken tegelijkertijd een hiaat aanwezig zijn (zie Figuur 4.2-4).

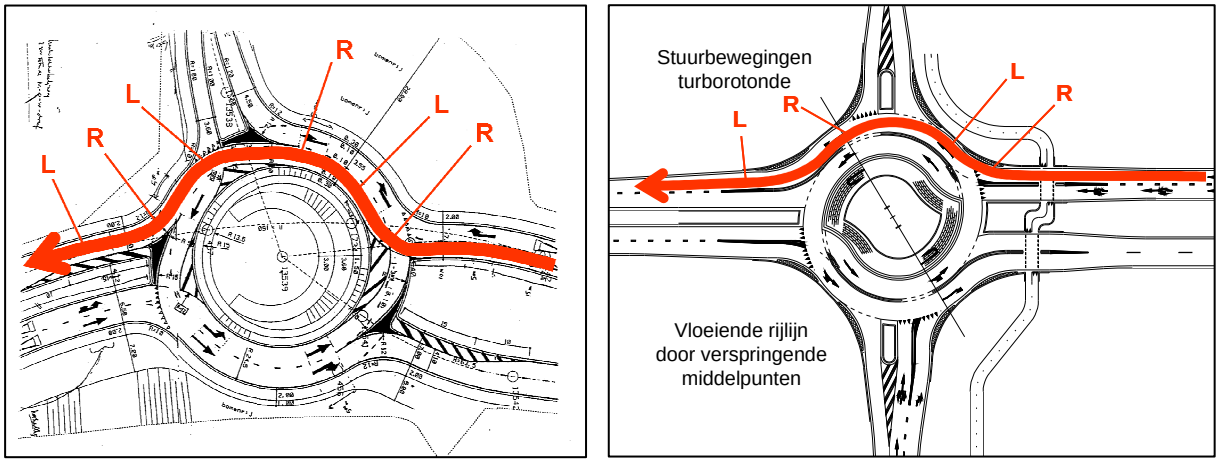
Ad c) Consequent toegepaste spiraalbelijning voorkomt weef- en snijconflicten

Het verschil in het aantal conflictpunten op een concentrische tweestrooksrotonde en een turborotonde is in Figuur 3.1-1 in beeld gebracht. Bij een gelijk aantal rijstroken op de afvoertakken telt de concentrische tweestrooksrotonde 12 voorrangsconflicten, 2 weefconflicten en 2 snijconflicten, terwijl bij een turborotonde het aantal beperkt blijft tot 10 voorrangsconflictpunten.

Ad d) Soepel verlopende spiraalbelijning voorkomt onnodige stuurbewegingen

Kenmerkend voor de turborotonde is, dat al in het geometrisch ontwerp rekening wordt gehouden met de toepassing van spiraalbelijning. Dit biedt niet alleen qua veiligheid maar ook qua rijcomfort voordelen. In vergelijking met spiraalbelijning aangebracht op een concentrische rotonde zijn er minder stuurbewegingen nodig (zie Figuur 3.3-2). Als op een bestaande dubbelstrooksrotonde de cirkelvormige belijning vervangen wordt door spiraalbelijning, moeten de berijders 50% meer stuurbewegingen uitvoeren dan nodig is. Op

een turborotonde worden soepele rijlijnen verkregen door toepassing van cirkels met wisselende middelpunten (zie paragraaf 3.5.2).



Figuur 3.3-2 Verschil in stuurbewegingen op concentrische rotonde met spiraalbelijning en turborotonde

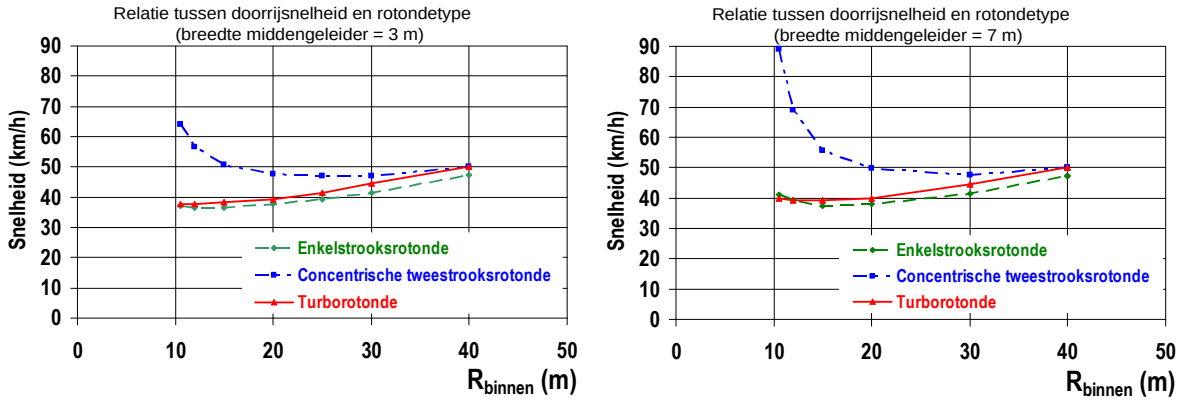
Ad e) en f) Op ieder segment een keuzestrook en ten minste twee afvoertakken met twee rijstroken

Deze kenmerken hebben bij de ontwikkeling van het turborotonde-concept een belangrijke rol gespeeld. Immers, het doel was een rotonde te ontwerpen die niet alleen een grotere capaciteit heeft dan een enkelstrooksrotonde, maar ook variaties in het belastingpatroon goed kan verwerken (robuustheidkenmerk). Daarvoor is het van belang dat op alle segmenten een keuzestrook voorkomt, d.w.z. een strook waarop men zowel de rotonde kan vervolgen als kan afslaan.

Daarmee hangt samen dat op de hoofdtakken de uitgangen uit twee rijstroken bestaan (capaciteitsaspect). In verband met de oversteekbaarheid van het langzame verkeer is het echter gewenst om het aantal rijstroken op de afvoertakken zo beperkt mogelijk te houden. In het afwegingsproces kan dat er toe leiden er toch voor te kiezen om zo weinig mogelijk afvoertakken dubbelstrooks uit te voeren. Tegen die achtergrond worden de kenmerken e) en f) niet als essentiële kenmerken van de turborotonde beschouwd, met ‘partieel’ als toevoeging in de naam van de rotonde.

Ad g)en h) Overrijdbaar verhoogde baanscheidingen en een kleine rotonde-diameter

De veiligheid van een rotonde wordt in hoge mate bepaald door de doorrijsnelheden. Op concentrische tweestrooksrotondes is op rustige momenten de verleiding om bochten af te snijden zeer groot. Figuur 3.3-3 brengt voor drie rotondevormen de relatie tussen de doorrijsnelheid en de binnenstraal van de rotondeboog in beeld, mede in relatie tot de breedte van de middengeleider in de aansluitende takken. Daarbij is steeds dezelfde acceptabele centripetale versnelling gehanteerd, ervan uitgaande dat de bestuurders op de rotonde niet decelereren of accelereren (zie Bijlage B.2.1). Verder zijn afhankelijk van de straal de Nederlandse normen voor rijbaanbreedtes toegepast: een dubbelstrooks baan op de conventionele tweestrooksrotonde is minder breed dan twee banen op de turborotonde, omdat ervan wordt uitgegaan dat op een conventionele tweestrooksrotonde grote vrachtauto’s niet naast elkaar rijden (zie Bijlage B.2.2).



Figuur 3.3-3 Effect van verschil in rotondetype en breedte verkeersgeleider op de doorrijsnelheid

Hoe breder de middengeleider en hoe breder de rijbaan, hoe groter de optimale rotonde-diameter. Maar, met als resultaat een hogere snelheid. Op een enkelstrooksrotonde met een buitenstraal van 18 m is de snelheid van het verkeer 30 à 35 km/h. Op een tweestrooksrotonde met dubbelstrooks aanvoertakken en enkelstrooks afvoertakken ligt die snelheid al gauw 10 km/h hoger (bij een breedte van de middengeleiders van 7 m bedraagt de optimale binnenstraal ca. 26 m met een bijbehorende doorrijsnelheid van ca. 45 km/h). Dit betekent een verdubbeling van de botsenergie en een zeer sterke toename van de kans op dodelijke afloop van een ongeval met een fietser of voetganger.
De vergelijking van de curve voor de turborotonde met die van de conventionele dubbelstrooksrotonde laat het grote effect van scheidingsbanden (zie Figuur 3.3-3) op de doorrijsnelheid zien.

Ad i) Takken sluiten radiaal op de rotonde aan

In Nederland wordt ervoor gekozen om de rotondetakken loodrecht op de rotonde aan te sluiten. Dit principe moet echter niet worden overgenomen zonder de achtergrond daarvan te verwaarlozen. Want dan is de kans op extra ongevallen reëel. Het principe van deze oplossing is namelijk, dat voor de bestuurder zonder meer duidelijk is, dat hij bij het naderen van een rotonde afrijdt op een obstakel dat alleen met lage snelheid te vermijden is. Daarbij moet het obstakel zelf botsvriendelijk zijn. Dit betekent dat het middeneiland van de rotonde niet van een hoge rand moet zijn voorzien, maar dat voor de zichtbaarheid van de discontinuïteit vanaf al grote afstand een rotondeschild op het middeneiland de horizon in de rijrichting afschermt (zie Bijlage D.2).

Ad j) Overrijdbare stroken voor lange voertuigen

Het ontwerp van rotondes kenmerkt zich door het oplossen van dilemma's. Een belangrijk dilemma betreft de breedte van de rotondebaan. Uit *veiligheidsoogpunt* dient de rijbaanbreedte niet te royaal te zijn, terwijl uit een oogpunt van *berijdbaarheid voor vrachtverkee*r voldoende ruimte voor grote voertuigen noodzakelijk is. De oplossing van dit dilemma is aan de orde gekomen in paragraaf 2.3.3. Deze bestaat uit het toepassen van overrijdbaar verhoogde stroken ('rammelstroken'), zowel in het rotondecentrum als in de oksels van de aansluitende takken en voor zeer exceptioneel transport draagkrachtige bermstroken (zie Bijlage D.4).

3.4 Varianten turborotondes

Als gevolg van de beperking van het aantal rijstroken waaraan voorrang moet worden verleend tot twee, zijn turborotondevarianten noodzakelijk, toegesneden op verschillende belastingpatronen. Bepalend is over welke hoek twee rijstroken – gelet op het belasting-patroon– naast elkaar dienen door te lopen. De hoofdvarianten (Figuur 3.4-1) kunnen worden onderscheiden naar de snelheid waarmee de binnenste rotondestrook overgaat in de buitenste rijstrook (de spoed van de baanverspringing, d.w.z. de booglengte waarover de rijbaan/-strook de breedte van één rijbaan/ -strook opschuift [122]).

1) Baanverspringing over 360^0, twee rotondes: knierotonde (vier en drie takken) en de gestrekte knierotonde (alleen drietaks, met vier verschillende posities).
2) Baanverspringing over 180^0, drie rotondes: de basis turborotonde, met daarvan afgeleid de eirotonde en de spiraalrotonde.
3) Baanverspringing over 120^0, de sterrotonde, speciaal voor drie takken; soms kan deze ook bruikbaar zijn voor vier takken om één bepaalde linksafmanoeuvre te faciliteren[123] (waarvoor dan vier verschillende posities onderzocht moeten worden).
4) Baanverspringing over 90^0, de rotorrotonde voor vier takken; voor drie takken is deze variant niet functioneel[124] (tenzij later de aanleg van een vierde tak wordt voorzien).

Wanneer de hoeveelheid verkeer van de zijtakken gering is, is het niet noodzakelijk om die aanvoertakken van dubbele stroken te voorzien. Uit een oogpunt van veiligheid voor het fietsverkeer bestaat dan de voorkeur om de aanvoertakken vanaf de zijwegen maar met één rijstrook uit te voeren. Dit is de eerste vorm van de turborotonde die is ontwikkeld. Deze vorm heeft de naam eirotonde gekregen. Bij de eirotonde is het aantal rijstroken van de aansluitende takken niet in overeenstemming met het aantal rijstroken op de rotonde[125]. Toch is de eirotonde als afzonderlijke hoofdvorm onderscheiden, zowel uit historische overwegingen als uit praktische. Voor situaties waarin meer verkeer vanaf de zijweg de rotonde oprijdt, is een variant ontwikkeld die ook vanaf de zijweg de rotonde met twee stroken nadert. Dan is het aantal rijstroken op de aansluitende tak wel in overeenstemming met die op de rotonde. Deze variant heeft oorspronkelijk de naam turborotonde gekregen, en geldt nu als de basisvorm van de turborotonde.

Afgezien van de eirotonde geldt als eis voor de te onderscheiden hoofdvormen, dat het aantal rijstroken op de takken in overeenstemming is met die op de rotonde.

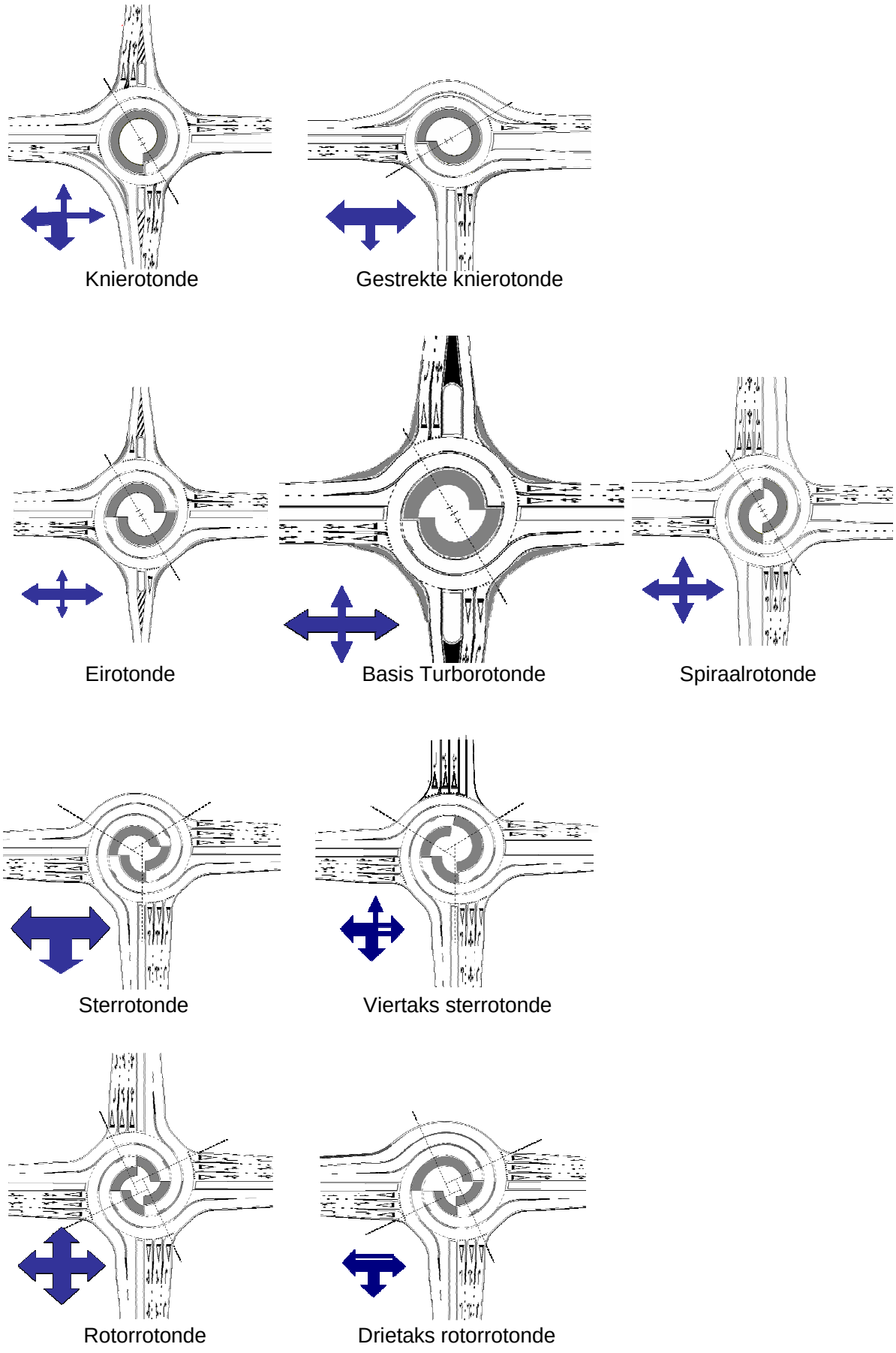
---

[122] Theoretisch is het ook mogelijk rotondevarianten te ontwikkelen geënt op een baanverspringing over $360^0/5= 72^0$. Maar dat levert dan geen rotondes op, die voldoen aan de voorwaarde dat aan niet meer dan twee rijstroken voorrang moet worden verleend.

[123] Deze variant is alleen mogelijk als één aansluitende tak niet uit drie maar uit twee rijstroken bestaat. In Fortuijn (2009a) ontbreekt deze variant. Uiteraard kan (in de getekende positie) vanaf rechts (oosten) nog een extra rechtsaffer worden gecreëerd naar het noorden (zodat ook daar de toerit uit drie stroken bestaat), maar dat is dan een by-pass, terwijl de retourbeweging over slechts één rijstrook kan beschikken.

[124] Motivering: met de sterrotonde wordt een grotere flexibiliteit bereikt (in getekende oriëntatie vanuit het oosten ook twee stroken linksaf).

[125] De eirotonde is daarom in feite geen hoofdvariant, maar het is de eerste turborotondevariant die door de auteur is getekend, terwijl deze in relatief veel situaties toepasbaar is.



Figuur 3.4-1 Overzicht typen turborotondes

Qua verkeerskundige functionaliteit zijn de varianten[126] als volgt te kenschetsen.

- Knierotonde: heeft voor één afslaande beweging zowel twee toevoer- als twee afvoerstroken (in de heen- en terugrichting). De twee andere takken hebben enkel- of dubbelstrooks oprijstroken en enkelstrooks afrijstroken.
- Gestrekte knierotonde: specifiek geschikt voor een drietaks kruising, waar de rechtdoorgaande stroom dominant is. Dit ontwerp heeft (in deze oriëntatie vanuit het oosten) één conflictpunt minder dan een basis turborotonde met drie takken en kan daardoor in principe iets meer verkeer verwerken.
- Basis turborotonde kenmerkt zich door:
  - twee dubbelstrooks aanvoertakken en twee dubbelstrooks afvoertakken;
  - twee dubbelstrooks aanvoertakken en twee enkelstrooks afvoertakken.

  Deze rotonde is geschikt voor een kruispunt waarvan één weg zich kenmerkt door een zware doorgaande hoofdstroom en een zijweg met minder verkeer.
- Eirotonde: is gebaseerd op de basis turborotonde, maar de zijtakken zijn voorzien van enkelstrooks toeritten. Hierdoor is deze rotonde geschikt voor een kruispunt met zeer weinig zijverkeer. Opgemerkt zij, dat de rijstroken niet in overeenstemming zijn met de mogelijkheden die het turboblock biedt.
- Spiraalrotonde kenmerkt zich door:
  - twee dubbelstrooks afvoertakken en twee enkelstrooks afvoertakken;
  - twee driestrooks aanvoertakken en twee dubbelstrooks aanvoertakken.

  Het turboblock van de spiraalrotonde lijkt op dat van de turborotonde, maar de binnenste strook begint een segment eerder, zodat ook het breedteverloop wat ruimer moet zijn. Deze rotonde is geschikt voor een kruispunt van een weg met zware doorgaande hoofdstromen en zijwegen met relatief veel verkeer, dat in belangrijke mate afslaat naar de hoofdweg.
- Sterrotonde kenmerkt zich door drie takken met dubbelstrooks afvoertakken en driestrooks aanvoertakken. Het voordeel is, dat dan op alle takken in alle richtingen twee stroken bruikbaar zijn. De middelste van de drie toeritstroken staat voor twee richtingen ter beschikking. Opgemerkt zij, dat de translatie-assen weliswaar onder een hoek van 120^0 t.o.v. elkaar staan, maar dat het vanuit veiligheidsoogpunt van belang is, dat de takken onderling onder een hoek van 90^0 of 180^0 aansluiten, zodat de doorrijsnelheid niet te hoog wordt.
- Viertaks sterrotonde. In deze variant wordt (in de getekende positie) vanaf de rechter toerit één linksafstrook weggehaald. Nog slechts vanaf één tak wordt voldaan aan het oorspronkelijke uitgangspunt van de sterrotonde dat in alle richtingen twee rijstroken ter beschikking staan. Toch kunnen er belastingpatronen zijn waarin deze variant beter past dan de spiraalrotonde.
- Rotorrotonde kenmerkt zich door vier dubbelstrooks afvoertakken en vier driestrooks aanvoertakken. Hierdoor ontstaan mogelijkheden om:
  - via twee stroken rechtsaf te slaan;
  - via twee stroken rechtdoor te gaan;
  - via één strook linksaf te slaan.

[126] In de TURBOROTONDEVERKENNNER zijn bij de knierotonde vier takoriëntaties nodig, afhankelijk van het belastingpatroon. Hetzelfde geldt voor de sterrotonde en de drietaksvariant van de rotorrotonde. Bij de eirotonde, basis turborotonde en spiraalrotonde zijn afhankelijk van het belastingpatroon twee takoriëntaties nodig. Bij de viertaks rotorrotonde volstaat één takoriëntatie.

Uiteraard zijn er combinaties mogelijk van vormen die eenzelfde turboblock hebben, d.w.z. dat de rijbaan op de rotonde over eenzelfde booglengte naar buiten opschuift (zie paragraaf 3.5.2.) Dat is het geval bij de eirotonde, basis turborotonde en de spiraalrotonde. Ook zijn er tussenvarianten mogelijk, door in plaats van twee of drie rijstroken in een aanvoertak er slechts één[127] aan te brengen (zoals bij de eirotonde gebeurt). Afgezien van partiële oplossingen, combinaties of tussenvarianten bevat deze opsomming alle mogelijke varianten, die voldoen aan alle genoemde tien eisen voor een turborotonde uit paragraaf 3.3.

3.5 Ontwerpelementen turborotondes

3.5.1 Afwijkende ontwerpelementen turborotondes

De turborotonde vraagt een afwijkende ontwerpmethodiek: in plaats van concentrische cirkels (cirkels met hetzelfde middelpunt) moeten nu spiraalvormige bogen gebruikt worden. Het biedt voordelen om geen zuivere spiraalvorm te gebruiken, maar deze te benaderen door cirkels met verspringende middelpunten. Dat geldt zowel voor het bouwen van de rotonde als voor het berijden. Het voordeel daarvan is tweeledig:

- bij het uitzetten tijdens de bouw kan gewoon van cirkels worden uitgegaan, zij het met verspringende middelpunten;
- wanneer de translatie-as goed is gesitueerd, kunnen de meeste automobilisten met minimale stuurcorrecties de rotonde berijden.

De as waarlangs deze middelpunten verspringen wordt de *translatie-as* genoemd. Afhankelijk van de spoed van de spiraal varieert het aantal translatie-assen en de wijze waarop de middelpunten verspringen. Het samenstel van translatie-assen met de cirkelbogen voor de rotondestroken wordt aangeduid als *turboblock*, een term ontleend aan de geautomatiseerde tekentechniek. De positionering daarvan moet aan de nodige eisen voldoen.

Het afsnijden van bochten op de rotonde kan worden voorkomen door *verhoogde strookscheidingen* tussen de rijstroken[128]. Op rotondes met concentrische belijning is het niet mogelijk om afzonderlijke rotondebanen te vormen, omdat de voertuigen op de rotonde voortdurend van strook moeten wisselen. Het toepassen van verhoogde strookscheidingen maakt het mogelijk om turborotondes toe te passen met een kleinere diameter, terwijl de snelheid in alle richtingen lager is.
Om te voorkomen dat bestuurders van motorvoertuigen op de rotonde alsnog van strook moeten wisselen, dienen zij al vóór de rotonde de juiste rijstrook gekozen te hebben. Dit stelt speciale eisen aan de *wegmarkering* en de *bewegwijzering.*

3.5.2 Turboblock

De wijze waarop de middelpunten moeten verspringen, hangt samen met de mate waarin de rijstroken bij het rondgaan naar buiten opschuiven. Bij een knierotonde moet de rijcurve na één rondgang één rijbaan + baanscheiding (aangeduid als *rijbaanbreedteplus*) zijn

[127] Drie rijstroken op de toerit vervangen door twee rijstroken kan voor de verkeersdeelnemers onduidelijkheid in het gebruik van de middelste rotondestrook opleveren.
[128] Op plaatsen waar de rotondestroken gescheiden worden door betonnen bandjes zijn ze ook als rotondebanen aan te duiden.

opgeschoven[129]. Dat betekent dat de middelpunten op één translatie-as over een afstand van een halve *rijbaanbreedteplus* verspringen. Op de turborotonde, eirotonde en spiraalrotonde moet de rijcurve na een halve rondgang over deze afstand zijn opgeschoven. Dat betekent dat de middelpunten over één translatie-as heen en weer springen, over een afstand die gelijk is aan *rijbaanbreedteplus*. Op een sterrotonde moet de rijcurve na een cirkelboog van 120^0 een *rijbaanbreedteplus* zijn opgeschoven. Daarvoor zijn drie basis translatie-assen nodig. Op een rotorrotonde moet de rijcurve al na een kwartcirkel een *rijbaanbreedteplus* zijn opgeschoven. Daarvoor zijn vier basis translatie-assen nodig.

Hetzelfde geldt voor een groot turboplein met verkeerslichten (zie paragraaf 5.3.3). Ook dan moet het mogelijk zijn op elk rotondekwadrant ter plaatse van de aansluitende takken extra rijstroken toe te voegen. Ook dan zijn vier translatie-assen nodig. Het aantal rijstroken dat per kwadrant toegevoegd moet worden, bepaalt de afstand waarover de middelpunten moeten verspringen. Als het om één rijstrook gaat, is die ca. 5 m; als het om twee rijstroken gaat is dat ca.10 m.

Omdat de straal van de buitenste rotondestrook groter is dan van de binnenste, kan de bochtverbreding minder zijn. Dat betekent dat de buitenste rotondestroken smaller zijn dan de binnenste. Dat houdt in dat de afstand tussen de middelpunten voor de buitenste rotondestroken kleiner is dan voor de binnenste. Bij meer dan één translatie-as zijn voor het laten verspringen van de middelpunten over afwijkende afstanden ook hulp translatie-assen nodig.

Het ontwerp van een turboblock is complexer wanneer in het ontwerp ervan uit wordt gegaan dat niet de wegkant maar de kantmarkering een continu verloop dient te hebben. Het ontwerp van de verschillende turboblocks wordt behandeld in Bijlage E *Ontwerp turboblockvarianten.*

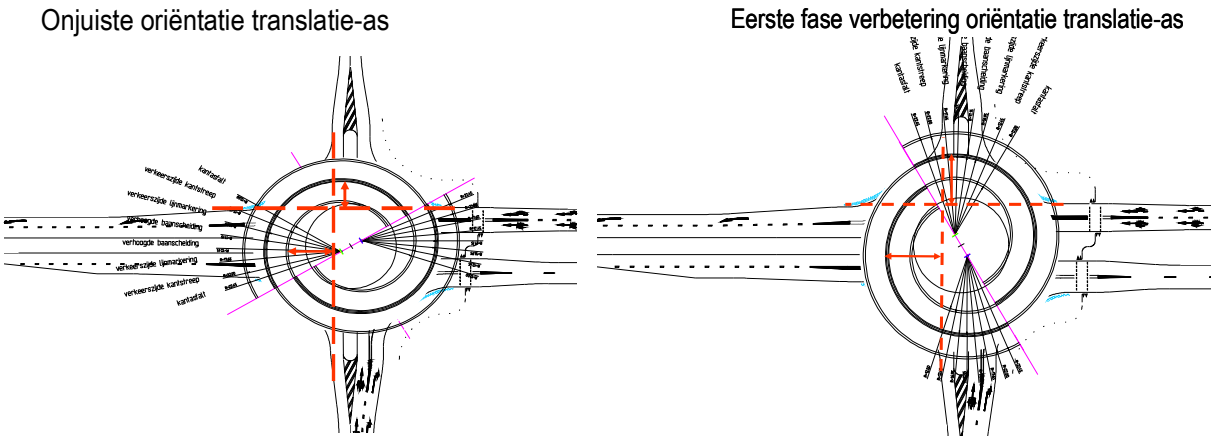
3.5.3 Invloed positionering translatie-as op snelheidsreductie en comfort

Voor de positionering van de translatie-as zijn twee zaken van belang:
a) de snelheidsreductie, die vanuit alle richtingen ongeveer gelijk moet zijn;
b) het rijcomfort.

Invloed positionering translatie-as op snelheidsreductie

Bij rotondes die ontworpen worden met één translatie-as, is het van belang dat de uitwijking van de rijcurve in een ‘rechtdoorgaande’ beweging vanuit alle richtingen ongeveer gelijk is. Bedacht moet worden dat het aantal rijstroken op de afvoertak invloed heeft op de uitwijking die bij een bepaalde rotondestraal bereikt kan worden. Met de keuze van de hoek van de translatie-as kan dat worden gecompenseerd. Zo kan alsnog worden bereikt dat de snelheidsreductie vanuit alle richtingen ongeveer gelijk is.
In het linker deel van Figuur 3.5-1 is de uitwijking in oost-west richting veel kleiner dan in noord-zuid richting Door draaiing van de translatie-as worden de uitwijkingen in oost-west richting en noord-zuid richting ongeveer gelijk (rechter deel van Figuur 3.5-1).

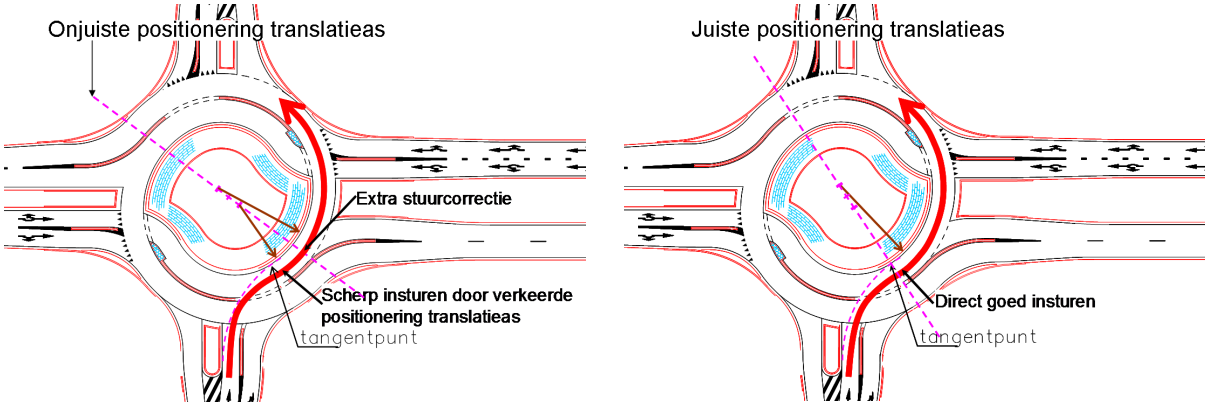
[129] De *rijbaanbreedteplus* is gelijk aan de som van de rijstrookbreedte + kantstrepen + kantstroken + baanscheiding.



Figuur 3.5-1 Oriëntatie translatie-as qua doorrijsnelheid

Invloed positionering translatie-as op rijcomfort

Voor een goed rijcomfort is het van belang dat de automobilist na het oprijden van de rotonde niet onmiddellijk met wisselende rotondestralen geconfronteerd wordt. Dat betekent dat de translatie-as zo moet liggen dat die de rotondesegmenten snijdt direct voor de raakpunten van de toeritbogen en de rotondebogen (Figuur 3.5-2).



Figuur 3.5-2 Positionering translatie-as qua stuurmanoeuvre

3.5.4 Overrijdbaar verhoogde strookscheidingen

Beoogde effecten

Op een rotonde die voorzien is van spiraalbelijning is het wisselen van rijstrook niet nodig. Dan kan de rijstrookscheiding verhoogd zijn, waardoor twee rijbanen ontstaan. Het effect van de overrijdbaar verhoogde strookscheidingen op de doorrijsnelheid is in Figuur 3.3-3 in beeld gebracht. Om de rotonde ook voor zeer lange voertuigen berijdbaar te laten zijn, dient het mogelijk te zijn om deze verhogingen met lage snelheid te overrijden (waarbij een personenauto die zich dan op de baan links van de vrachtauto bevindt, eventueel kan uitwijken naar het overrijdbare middenplateau). Het overrijden van de rijstrookscheiding met hoge snelheid moet echter zoveel discomfort opleveren dat het afsnijden onaantrekkelijk wordt.

Naast het belangrijke snelheidsbeheersend aspect van de strookscheiding, verkleint een meer gedisciplineerd volgen van de rijstroken het aantal schampaanrijdingen. Uit reacties van motorrijders blijkt, dat met name de veel kleinere kans dat een automobilist onvoorzien van rijstrook wisselt als zeer positief wordt ervaren en het veelal wint van een gevoel van een groter risico van het zelf raken van de verhoging.

Algemene vormgevingseisen

De vormgeving van een verhoogde rijstrookscheiding is zeer belangrijk. Eisen zijn:

a. de weggebruiker moet er niet door verrast worden;
b. bij lage snelheid moeten ze voor grote voertuigen zonder schade overrijdbaar zijn;
c. bij hogere snelheid moeten ze voldoende discomfort opleveren om het afsnijden tegen te gaan.

Ad. a. De eerste eis houdt in dat de verhoging voor de weggebruiker goed zichtbaar is. Die zichtbaarheid moet onder alle omstandigheden gewaarborgd zijn. Dit kan bereikt worden door:

- een duidelijke belijning die de verhoging inleidt en markeert;
- glasreflectoren naast de belijning en op de verhoging;
- verlichting.

Ook is de materiaalkeuze belangrijk: een lichtgrijze betonnen band steekt goed af tegen het zwarte asfalt en biedt ook voldoende stroefheid. Doorgetrokken markering naast zo'n grijze verhoging onderstreept dan de betekenis ervan voor het verkeer.

Ad. b. Om te zorgen dat de verhoging met lage snelheid goed overrijdbaar is, mag de opstaande kant niet hoger zijn dan 3 cm.

Ad. c. Om voldoende discomfort te verkrijgen bij hogere snelheden is de totale hoogte van de constructie van groot belang. Uit gehouden proeven lijkt een hoogte van 7 cm bij een breedte van 30 cm een goed resultaat op te leveren.

Mogelijke nadelen

De verkeersveiligheidwinst die met verhoogde overrijdbare rijstrookscheidingen verkregen kan worden, is evident. Dat wordt bereikt door het afdwingen van een lagere snelheid: de bestuurder moet binnen de rijstrookscheiding zijn eigen rijbaan met een aangepaste snelheid blijven volgen; zonder discomfort kan hij niet meer afsnijden. Dat betekent – rekening houdend met het feit dat er altijd bestuurders zijn die grensrisico's nemen – dat er ook bestuurders zullen zijn, die de rotonde berijden met een snelheid die tot de uiterste grens gaat en soms er overheen (zie Bijlage C.1). Als de automobilist dan door de een of andere oorzaak de macht over het stuur verliest (of als een motorrijder door het scheidingsbandje ten val komt) zullen ongetwijfeld de aangebrachte verhoging daarvan de schuld krijgen. Procedures om dan de wegbeheerder aansprakelijk te stellen zullen volgen.

Tegen die achtergrond moet bedacht worden dat het voor de wegbeheerder heel eenvoudig is om zo'n procedure te ontlopen, namelijk door de verhogingen niet aan te brengen. Voor het groter aantal ongevallen dat dan ongetwijfeld zal plaatsvinden (en waarvan de afloop over het

algemeen ernstiger zal zijn) zal de wegbeheerder niet aansprakelijk kunnen worden gesteld. De overheid zou daarvoor kunnen kiezen, maar dat is niet in het algemeen belang.

Juridische afweging

Het voorgaande leidt tot een juridische afweging. Bekend is dat bepaalde verkeerssituaties tot aansprakelijkheidsstelling van de wegbeheerder kunnen leiden. Dat gebeurt ook in situaties waarin het door de wegbeheerder gewenste gedrag door obstakels wordt afgedwongen. Uit de jurisprudentie m.b.t. het beruchte bussluisarrest (schade als gevolg van het passeren van een bussluis door een taxibestuurder) van de Hoge Raad (20 maart 1992, NJ 1993/547, RvdW 1992, 89) blijkt dat de uitvoering van het obstakel zelf van zeer groot belang is. Een uitspraak van het Hof Amsterdam 20 december 1993 (Verkeerrecht 1994, 151) bevestigt dit. Daar tegenover staat dat bij drempels een ondersteuning d.m.v. borden wel als voldoende wordt ervaren (Ktr. Delft 18 januari 1996, Verkeerrecht 1996, 139).

Deze jurisprudentie laat verder zien dat bepalend is, dat het – ook voor de minder voorzichtige weggebruiker – evident moet zijn wat hem of haar in een bepaalde wegsituatie te wachten staat. De mate waarin de wegbeheerder de weggebruiker tijdig voor het bestaan van deze feitelijke situatie waarschuwt, is daarin het belangrijkste. Evenwel, hiermee kan niet ieder ongeval worden voorkomen. Hoe goed de weggebruiker voor een obstakel ook wordt gewaarschuwd, ieder obstakel draagt in principe de kans op een ongeval in zich. Tegen die achtergrond is het doel waarvoor zo'n obstakel is gecreëerd, niet zonder betekenis.

In tegenstelling tot de situatie van de bussluis, gaat het hier niet om het bevorderen van een bepaalde doelgroep, maar om een hoger doel: de bevordering van de verkeersveiligheid. Immers, een verhoogde rijstrookscheiding reduceert de snelheid waarmee de rotonde bereden kan worden, zodat het algemeen veiligheidsbelang wordt gediend, terwijl de kans op schade – die inherent is aan een te hoog risiconemend gedrag van weggebruikers bij het overrijden van de strookscheidingen – zo klein is, dat in totaliteit een veiligheidswinst verwacht mag worden.

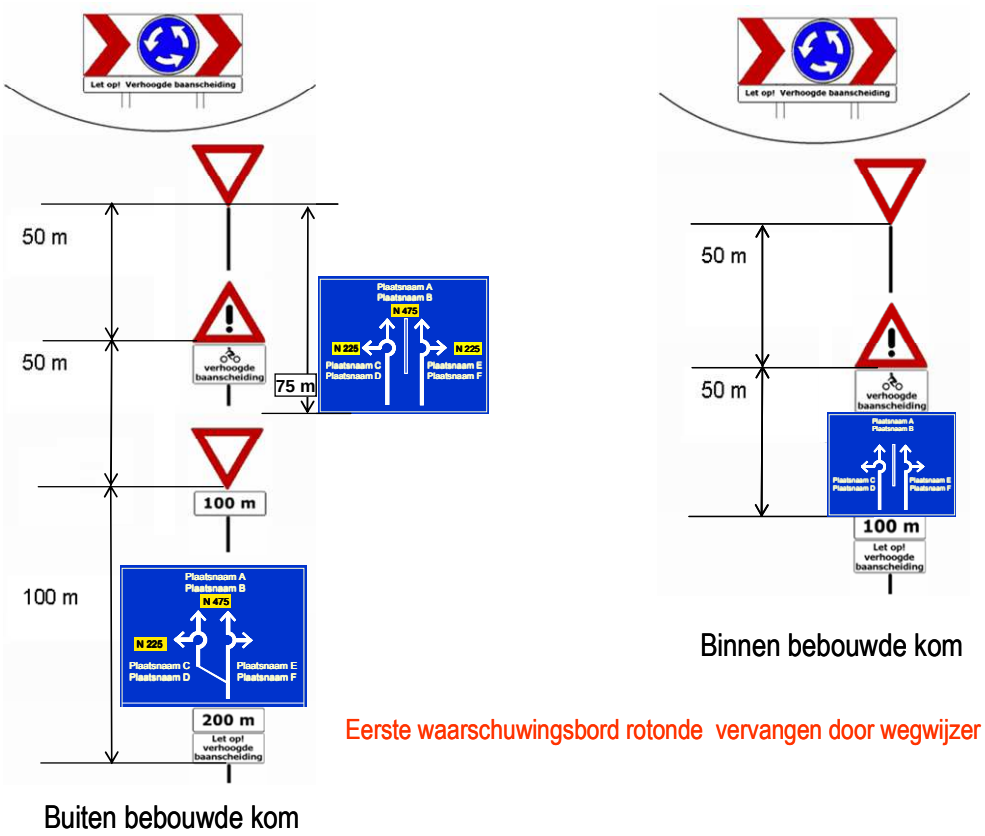
Ook is er een essentieel verschil in de vormgeving: de bussluis bereikt zijn effect doordat hij ernstige schade berokkent aan de auto indien toch wordt doorgereden, terwijl hier het beoogde doel wordt bereikt door discomfort dat men ervaart indien ondanks de waarschuwingen de strookscheiding toch wordt overschreden. Schade ontstaat alleen als ook op andere wijze van onjuist handelen sprake is, bijvoorbeeld nadering met te hoge snelheid, al dan niet gecombineerd met een schrikreactie op het discomfort dat dan optreedt. Voor een motorrijder ontstaat een kans op een valpartij wanneer men de markering negeert en in een vrije bochtkoers er overheen rijdt.

Voor het attenderen op het risico dat genomen wordt bij het overrijden van de strookscheiding wordt deze zodanig aangebracht, dat:

- deze onder alle omstandigheden goed zichtbaar is (door middel van een materiaalkeuze die tegen het asfalt afsteekt, aangevuld met reflecterende belijning, openbare verlichting en glasreflectoren);

– een doorgetrokken streep, c.q. wit vlak overschreden moet worden om over de verhoging te rijden;
– het discomfort dat ervaren wordt wanneer er met een snelheid van 40 à 60 km/h overheen gereden wordt, zodanig is, dat voor ieder duidelijk kan zijn dat zo'n rijgedrag ongewenst is, zonder dat er dan over het algemeen schade ontstaat.

Voorts wordt ter vermindering van het risiconemend gedrag de rijstrookscheiding ondersteund door bebording met onderschriften. Die is schematisch in beeld gebracht[130] in Figuur 3.5-3 (zie ook paragraaf 3.6).



Figuur 3.5-3 Verkeersborden bij nadering turborotonde

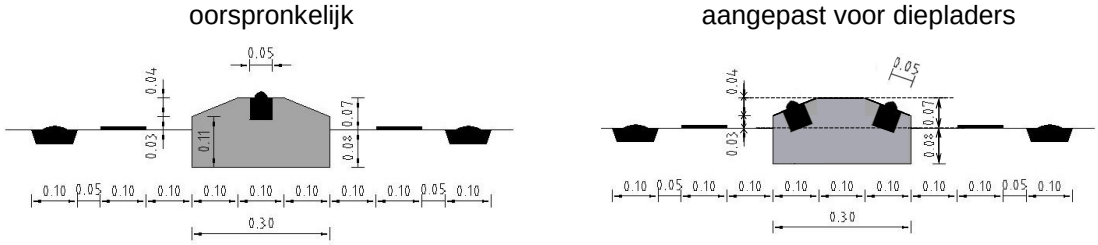
Gelet op de jurisprudentie betekent dit, dat er sprake is van een bijzondere wegsituatie waarvoor de wegbeheerder de weggebruiker in voldoende mate gewaarschuwd heeft.
Zoals ook op volkomen vlakke en rechte weggedeelten motorvoertuigen van de weg raken, zullen ongetwijfeld ook ter plaatse van een verhoging ongevallen plaatsvinden. Degene die dat overkomt, heeft die schade dan uitsluitend aan zichzelf te wijten, omdat:
- daarvoor van tevoren door borden in voldoende mate gewaarschuwd is, en

[130] Volledigheidshalve wordt nog opgemerkt dat in het BABW (V&W, 1990) is vermeld, dat het eerste waarschuwingsbord (RVV J9) voor de rotonde achterwege gelaten kan worden, mits de rotonde bij nadering goed zichtbaar is. Aangezien bij mist aan die voorwaarde niet wordt voldaan, is het beter om de functie van het eerste waarschuwingsbord door de voorwegwijzer te laten overnemen. Dit betekent, dat naar het inzicht van de auteur buiten de bebouwde kom alleen bij aanwezigheid van een voorwegwijzer het eerste waarschuwingsbord kan vervallen.

- ter plekke het obstakel onder alle omstandigheden – afgezien van sneeuw– duidelijk zichtbaar is.

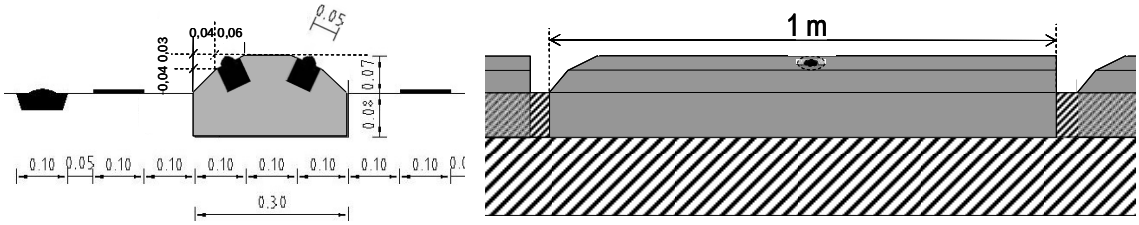
Detaillering van de vormgeving

Op 18 maart 1998 (Fortuijn, 2000b) zijn rijproeven uitgevoerd met vier alternatieven voor de vormgeving van de scheidingsband, die van elkaar verschilden in breedte en hoogte. De conclusie van bestuurders van uiteenlopende typen personenauto's was, dat een profiel dat 30 cm breed is en een hoogte heeft die van 3 cm tot 7 cm oploopt (over een afstand van 10 cm) in discomfort niet onder doet voor een hoger exemplaar dat breder is.
Aanvankelijk werden de betonelementen van de scheidingsband op de toplaag van het asfalt geplakt. Doordat vrachtautowielen regelmatig over de elementen heen rijden is echter de kans op breuk van geplakte elementen te groot. Ook bleek een profiel van 10 cm dik nog te zwak. Daarom verdient het sterk de voorkeur dikkere gewapende betonelementen, van 15 cm dik, toe te passen, die 8 cm verdiept in het asfalt worden aangebracht. Maar ook dan is de kwaliteitsbeheersing bij het verlijmen van groot belang, om te voorkomen dat de elementen te gemakkelijk losraken.



Figuur 3.5-4 Profiel rijstrookscheiding

Het oorspronkelijke profiel (Figuur 3.5-4) is aangepast, omdat diepladers reflectoren die bovenop zijn geplaatst, eraf rijden (V&W, 2009b, p.75). De reflectoren moeten wel zo zijn uitgevoerd dat ze ook bij een niet-horizontale plaatsing het licht van de koplampen in alle richtingen reflecteren. In gebieden waar men met zware sneeuwval heeft te maken kan men ook de rechtopstaande zijkant vervangen door een schuin vlak. Wel moet men dan hetzelfde doen met de kopse kant (Figuur 3.5-5).



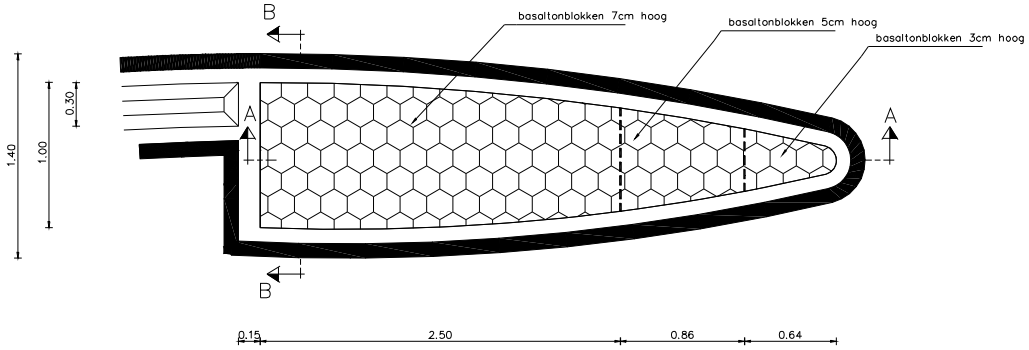
Figuur 3.5-5 Rijstrookscheiding voor gebieden met zware sneeuwval (dwars- en lengteprofiel)

3.5.5 Begin binnenste rotondestrook

Accentuering met overrijdbare druppel

Bij toepassing van spiraalbelijning ontspringen op de rotonde aan de binnenkant nieuwe rijstroken. In het turboconcept beginnen die op volle breedte tegenover een toerit van een

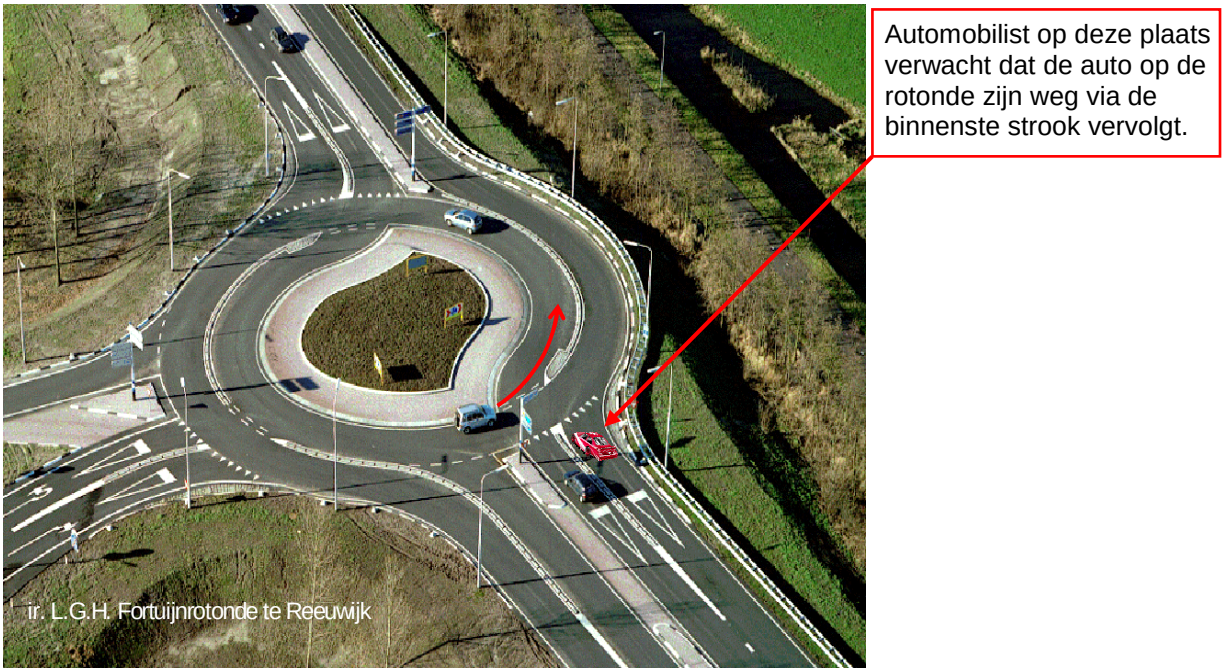
aansluitende tak. De vormgeving vraagt enige aandacht. Het 'bochtafsnijden' gaat in Nederland zover dat bestuurders –ondanks het discomfort dat dit met zich meebrengt– op die plaats van de buitenste strook overgaan naar de binnenste. Op een partiële turborotonde komt men dan in de problemen. Het aanbrengen van een overrijdbare druppel verbetert de zichtbaarheid van het begin van de linkerkant van de binnenste rijstrook. Zie Figuur 3.5-6.



Figuur 3.5-6 Detaillering verhoogd overrijdbare druppel

Rechthoekige binnenhoek

Het oorspronkelijke ontwerp van het begin van de binnenste rijstrook blijkt ook nog op een ander punt voor verbetering vatbaar. De linkerkant van de binnenste rijstrook heeft een vloeiend verloop. Bij weggebruikers die vanaf de rechterrijstrook van de aansluitende tak de rotonde willen oprijden bestaat dan soms de verwachting dat een naderende auto via die binnenste rijstrook zijn weg zal vervolgen. Dit kan tot (bijna) aanrijdingen leiden (Figuur 3.5-7).



Figuur 3.5-7 Geconstateerd misverstand bij oprijden via rechter toeritstrook

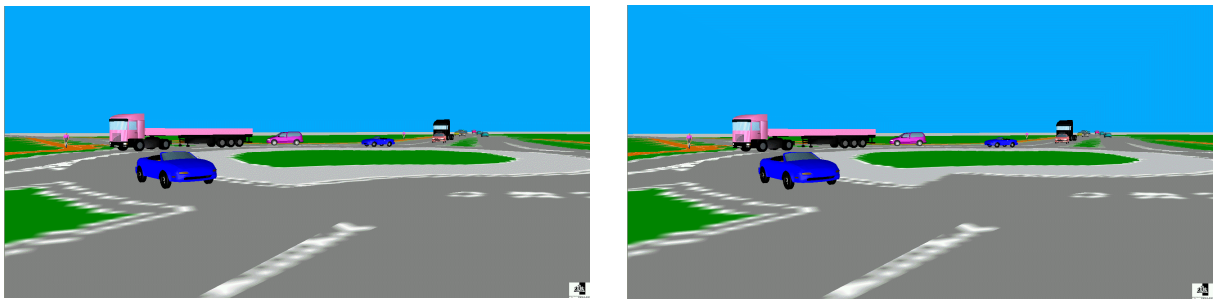
Om dat risico te verminderen moet de indruk worden weggenomen, dat de rotondebaan via de binnenste strook doorloopt. Dit kan door de binnenste rijstrook links met een rechte hoek te

laten beginnen. Dit is afgebeeld in Figuur 3.5-8 bij de zuidwestelijke aansluiting in tegenstelling tot de noordoostelijke (niet bedoeld om zo te realiseren). Het verschil in beeld dat dit voor de bestuurder vanaf de rechter rijstrook van de toerit oplevert, is te zien door vergelijking van de linker en rechter afbeelding van Figuur 3.5-9.



Figuur 3.5-8 Rechthoekige binnenhoek binnenste rotondestrook

Een rechthoekig begin (Figuur 3.5-9, rechts) helpt de suggestie te doorbreken dat de rotondestrook via de binnenste zijn vervolg krijgt.



Figuur 3.5-9 Varianten begin van de binnenste rotondestrook vanaf de rechter rijstrook van de toerit gezien

3.6 Bewegwijzering en pijlmarkering voor turborotondes

3.6.1 Rotondepijlen op de aanvoerwegen

Bij turborotondes moet de bestuurder vóór de rotonde de juiste rijstrook kiezen. Daarin moet hij ondersteund worden. Tegen die achtergrond is een rotondepijlmarkering ontwikkeld met een hogere informatiewaarde dan de in 1996 gebruikelijke standaard pijlmarkering. Daartoe wordt in de pijlmarkering op de toevoerwegen de ronde vorm van de rotonde verwerkt. Aan het rotondesymbool ontspringen dan pijlen die de uiteindelijk te kiezen richting aangeven. Voor de maatvoering is uitgegaan van de verhoudingen die in Nederland voor pijlen binnen de bebouwde kom gebruikelijk zijn (Fortuijn, 2000c).

Deze pijlvorm maakt drie dingen voor de weggebruiker duidelijk:

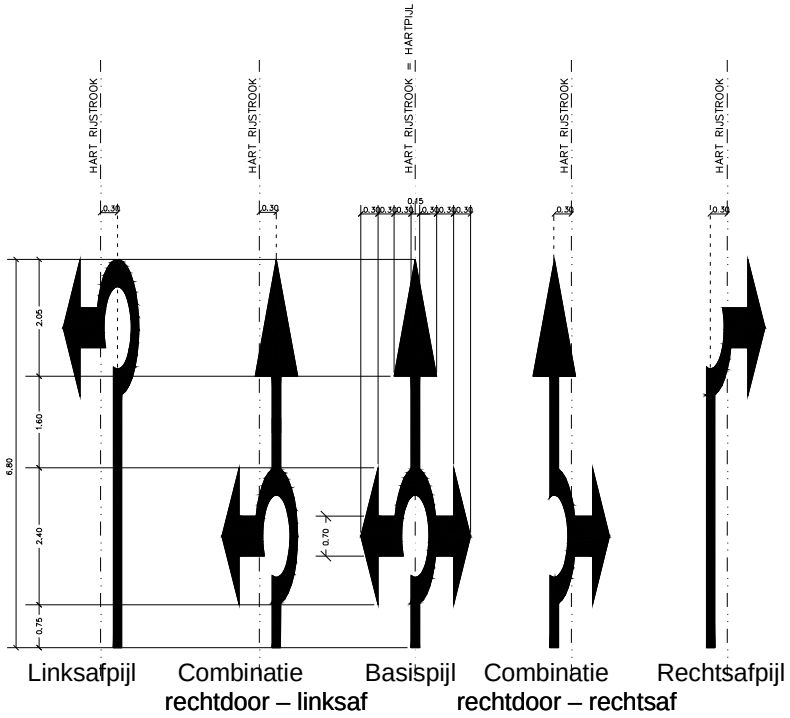
- dat de vervolgroute wordt afgewikkeld via een rotonde waarop de markering de te volgen rijstroken aangeven (ondersteunt de voorspelbaarheid van het wegverloop);

- welke rijstrook op de aanvoertak voor welke afslagrichting bestemd is (ondersteunt de juiste rijstrookkeuze op de aanvoertak);
- welke afslag op de betreffende rotondestrook genomen moet worden (ondersteunt de juiste afslagkeuze).

Door TNO Technische Menskunde is een studie verricht naar de begrijpelijkheid van rotondepijlen op voorsorteervakken en wegwijzers bij turborotondes (Martens, 2001).
Na dit TNO-onderzoek zijn de schachten van de rechtsafpijl en de linksafpijl even lang gemaakt als van de rechtdoor- en de combipijlen. Daardoor ligt het rotondesymbool verder weg, ter hoogte van de punt van de rechtdoorpijl, zoals gebruikelijk bij de Nederlandse pijlmarkering. In dit TNO-onderzoek bleek verder dat de bekende standaardpijl (die normaal voor kruispunten wordt toegepast) de bestuurder niet ondersteunt in de keuze van de juiste afrit op de rotonde. Als een bestuurder het moet stellen met uitsluitend een voorwegwijzer, voegt een standaardpijl niets toe aan de juiste keuze voor de afslag: met ca. 60% is de proportie juiste antwoorden even hoog als zonder pijlmarkering! Een groot verschil met de 85 % die de lange rotondepijl dan scoort.

Ten aanzien van de lay-out van de pijlmarkering op de weg vóór een rotonde met rijstroken luiden de conclusies dan ook:

- geen standaard pijlen gebruiken maar rotondepijlen;
- de rotondepijlen moeten qua vorm zo dicht mogelijk aansluiten aan de bekende Nederlandse standaardpijl (de rechtsaf- en linksafpijl even lang als de rechtdoorpijl).



Figuur 3.6-1 Rotondepijlen op de aanvoertakken van een viertaksrotonde

Voorwaarde voor toepassing van deze pijlen is, dat de weggebruiker op de rotonde niet van rijstrook hoeft te wisselen. In CROW-publicatie 207 (2005a) zijn deze rotondepijlen in figuur 2.24 opgenomen.

3.6.2 Bewegwijzering

Ter plaatse van voorsorteerstroken

In genoemd TNO onderzoek (Martens, 2001) scoorden de combinaties van Figuur 3.6-4 t/m Figuur 3.6-6 qua fouten met de minste fouten, maar de kortste reactietijden werden gemeten in een configuratie met wegwijzerborden boven de weg in combinatie met lange rotondepijlen.

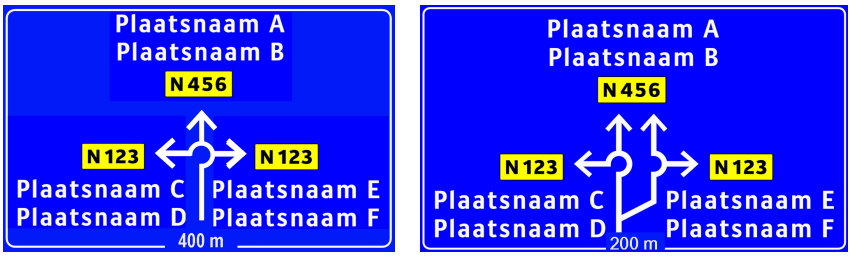


Figuur 3.6-2 Combinatie van wegwijzers en pijlmarkering met gelijke symbolen

In de oplossingen van Figuur 3.6-4 t/m Figuur 3.6-6 bedroeg die tijd 1 seconde meer (7 versus 6 seconde, steeds gemeten vanaf de start van het filmpje op 500 m voor de rotonde met een 'naderingssnelheid' van 80 km/h). Zonder overig verkeer is dat ruim voldoende om op tijd de juiste strook te kiezen. Maar als ander verkeer ook de nodige aandacht vergt wordt dat anders.

Vóór de voorsorteervakken

Over het algemeen worden voor turborotondes korte wachtrijen berekend[131]. Dat betekent dat wegbeheerders ook korte opstelstroken zullen toepassen. Veelal zijn opstelstroken van ca. 70 m of nog korter voldoende. Het probleem doet zich dan echter voor, dat vooral oudere weggebruikers – zonder adequate voorinformatie – te weinig tijd ter beschikking hebben om de juiste rijstrook te kiezen. Onderzoek laat zien dat bij oudere verkeersdeelnemers waarneemtijden van 5 s voorkomen (Staplin et al., 1998 en 2001, Davidse, 2007). Bij 72 km/h wordt dan een afstand van 100 m afgelegd. Staplin heeft ook een reactietijd bij ouderen van 2,5 s gevonden. Al met al betekent dit, dat de rotonde al gepasseerd zou zijn, voordat de juiste voorsorteerstrook is gekozen. Voorinformatie voor het bereiken van de voorsorteerstroken is dus noodzakelijk. Dit heeft de auteur ertoe gebracht in plaats van de traditionele voorwegwijzer (die bij een enkelstrooksrotonde adequate informatie verstrekt) de 'strookwisselwegwijzer' te ontwikkelen, zie Figuur 3.6-3 (Fortuijn, 2009c).



Figuur 3.6-3 Strookwisselwegwijzer (rechts) als alternatief voor traditionele voorwegwijzer (links)

[131] Omdat verkeerslichten hun effect ontlenen aan het clusteren van hiaten, zijn de wachtrijen daar langer dan bij een rotonde (uiteraard uitgaande van een verzadigingsgraad kleiner dan 0,8).

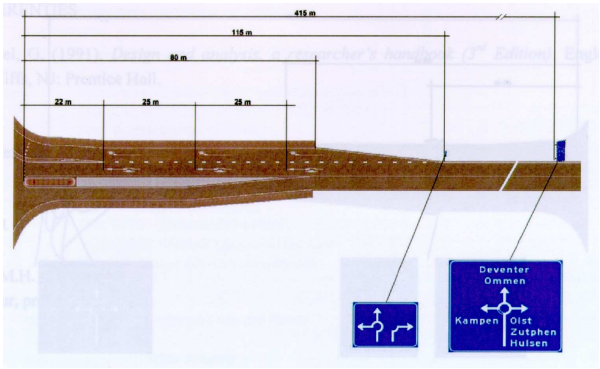
3.6.3 Samenspel tussen bewegwijzering en pijlmarkering

In genoemd onderzoek stond de onderlinge wisselwerking tussen pijlmarkering en bewegwijzering centraal. Gegeven de belangrijkste conclusies t.a.v. de lay-out voor de wegwijzers (geen vallende pijlen maar rotondesymbolen, zie Figuur 3.6-2) en de pijlmarkering (geen standaardpijlen maar lange rotondepijlen (Figuur 3.6-1) volgen hieronder de uitkomsten van de foutscores van de resterende combinaties.

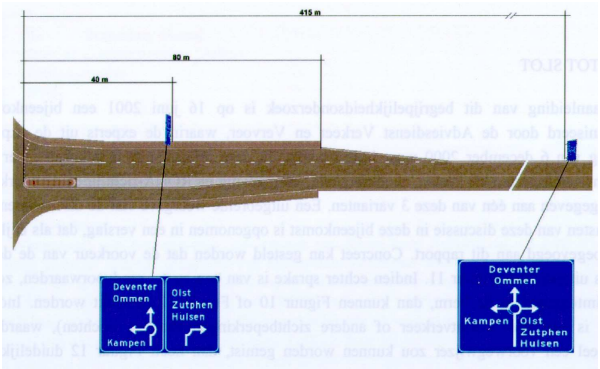
Tabel 3.6.1 Begrijpelijkheid samenspel bebording en markering

Voorwegwijzer met:	Proportie juiste antwoorden	
	Keuze rijstrook	Keuze afslag
Uitsluitend wegwijzers	94 – 96 %	85 – 91 %
Uitsluitend pijlmarkering	97 %	85 %
Wegwijzers + pijlmarkering	93 – 95%	82 – 88 %

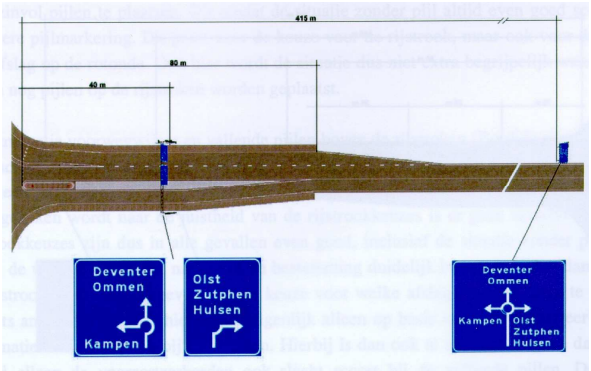
Uit Tabel 3.6.1 blijkt dat voor de juiste rijstrookkeuze de pijlmarkering mogelijk het duidelijkst is, maar dat voor de keuze van de juiste afslag de wegwijzers het mogelijk iets beter doen. Opmerkelijk is, dat voor de begrijpelijkheid de combinatie van pijlmarkering en wegwijzers praktisch niets toevoegt: in een situatie zonder verkeer scoort een combinatie zelfs slechter.



Figuur 3.6-4 Combinatie voorwegwijzer met lange rotondepijl



Figuur 3.6-5 Combinatie voorwegwijzer met bermborden



Figuur 3.6-6 Combinatie voorwegwijzer met portalen

De vraag is evenwel, of in een verkeerssituatie waarin een verkeersdeelnemer onder stress moet handelen dit ook zo is. Reacties van verkeersdeelnemers doen vermoeden, dat er wel degelijk behoefte bestaat aan zowel pijlen op de weg als aan wegwijzers die de strookindeling aangeven. Kennelijk neemt in een dergelijke situatie de behoefte aan redundantie toe. In publicatie CROW-126a 'Fietsoversteken op rotondes' (2002) en publicatie 207 'Richtlijnen voor de bebakening en markering van wegen' (2005a) is nog uitsluitend uitgegaan van de resultaten van het laboratorium onderzoek van TNO. Dat uitgangspunt is echter in CROW-handboek Turborotondes (CROW-257, 2008) losgelaten; daarin worden wegwijzers weer standaard gecombineerd met wegdekpijlen.

Ook is een ontwikkeling op juridisch terrein daarvoor van belang. Op 18 mei 2005 is door de kantonrechter van de rechtbank Zwolle–Lelystad een uitspraak gedaan, waaruit blijkt dat de rechterlijke macht de 'verplichting om op een kruispunt de richting te volgen die de voorsorteerstrook waarop zij (de bestuurders) zich bevinden aangeeft' (artikel 48 RVV 1990) direct verbindt met pijlmarkering op de weg. Dit ligt ook voor de hand, omdat de tekst van het RVV spreekt over 'de richting die de voorsorteerstrook aangeeft'. In de Nota van Toelichting blijkt dat het in dit artikel gaat over 'de vraag of nabij een kruispunt van rijstrook mag worden gewisseld en een andere richting mag worden gevolgd dan die aangeduid door in een rijstrook gestelde pijlen.' De werkingssfeer van artikel 78 RVV lijkt dus wel heel nauw verbonden met de aanwezigheid van richtingpijlen in de voorsorteerstroken. Dit betekent dat toepassing van pijlmarkering ook daarom al gewenst is.

3.7 Conclusies

De ontwerpmethodiek van de turborotonde is gebaseerd op de principes van het Duurzaam Veilig-concept. Daartoe wordt een spiraalvorm gehanteerd waarmee een reductie van het aantal conflictpunten wordt beoogd (*homogeniteit en herkenbaarheid*). De overrijdbaar verhoogde strookscheiding draagt er in belangrijke mate toe bij, dat weggebruikers daadwerkelijk de turborotonde gebruiken zoals bedoeld (*herkenbaarheid*), zodat de beoogde reductie van het aantal conflictpunten ook wordt geëffectueerd. Samen met de uitbuiging van de rijcurve – die de beperking van de conflictsnelheden realiseert (*homogeniteit*) –, betekent dit dat de turborotonde voldoet aan het tweede hoofdprincipe van Duurzaam Veilig (zie blz. 22).

Omdat de rijsnelheid op turborotondes laag is, kan de spiraalvorm worden benaderd met cirkels waarvan de middelpunten verspringen. Omdat het aantal rijstroken waaraan voorrang moet worden verleend uit veiligheidsoverwegingen beperkt is tot twee, ontstaan verschillende turborotondevarianten, afhankelijk van de hoek waarover twee rijstroken naast elkaar doorlopen. De turboblocken waarmee deze varianten ontworpen worden, verschillen in de booglengte waarover de rijbaan/-strook de breedte van één rijbaan/ -strook opschuift (de spoed). Verschillen in belastingpatronen zijn bepalend voor de te kiezen turborotondevariant.

Voor het realiseren van veiligheidsdoelstellingen in combinatie met randvoorwaarden ten aanzien van de berijdbaarheid, zijn ook ontwerpdetails bepalend. Voor beperking van de doorrijsnelheid is dat allereerst het toepassen van overrijdbaar verhoogde rijbaanscheidingen.

Maar ook in de vormgeving van de overrijdbaar verhoogde rijstrookscheiding zelf ontmoeten een aantal principes van Duurzaam Veilig elkaar (*herkenbaarheid en vergevingsgezindheid*). Verder is de combinatie van de hoek tussen de aansluitende takken, de breedte van de middengeleider in de aansluitende takken, de toegepaste rijbaanstralen en de breedte van de rijstroken uiteindelijk bepalend voor de doorrijsnelheid. Voor het garanderen van de berijdbaarheid voor grote voertuigen is dat de breedte van de overrijdbare stroken rond het rotondecentrum en in de aansluitoksels.

Het uitgangspunt van de turborotonde is, dat bestuurders vroegtijdig de juiste rijstrook kiezen. Daarvoor is een op elkaar afgestemd systeem van rijstrookpijlen voor zowel op het wegdek als wegwijzerborden ontwikkeld. Voorsorteervakken kunnen als gevolg van kleine wachtrijen veelal kort zijn. Weggebruikers hebben dan voorinformatie nodig over de indeling van de voorsorteerstroken die zij naderen. Voor het geven van die voorinformatie is de wisselstrookwijzer als alternatieve voorwegwijzer ontwikkeld.

4 Capaciteit turborotonde

Rekenmodellen voor de capaciteit spelen een belangrijke rol in het vooraf vergelijken van verkeerskundige oplossingen. Daarom wordt in dit proefschrift afzonderlijke aandacht besteed aan een capaciteitsmodel, waarmee (op een relatief eenvoudige wijze) turborotondes kunnen worden doorgerekend.

De turborotonde is niet alleen ontwikkeld met het oog op een betere veiligheid, maar ook met de verwachting dat een betere geleiding van het verkeer op de rotonde gunstig is voor de capaciteit. Dit vermoeden wordt vertaald in een drietal specifieke veronderstellingen (paragraaf 4.1.5)[132]. De analyse van beschikbare capaciteitsmodellen richt zich op de mogelijkheid deze veronderstellingen nader te onderzoeken. Aandacht voor de modelaannames is van belang voor het duiden van verschillen tussen de berekende en waargenomen capaciteit (paragraaf 4.2.5). Modelaanpassingen blijken nodig te zijn, om zowel deze verschillen te kunnen overbruggen alsook de invloed van het schijnconflict[133] te onderzoeken (paragraaf 4.2.8). In het onderzoek worden twee sporen gevolgd (paragraaf 4.3): het schatten van gedragsparameters op basis van hiaatmetingen en op basis van capaciteitsmetingen. Onderzoek van het schijnconflict maakt dit noodzakelijk, maar de vergelijking met capaciteitsmetingen brengt onverwacht ook een structurele overschatting van hiaatacceptatie-modellen in complexe beoordelingssituaties aan het licht (paragraaf 4.2.8 en 4.5.3). In verband hiermee wordt nagegaan in hoeverre het nodig is om de assumpties uit paragraaf 4.2.5 ter discussie te stellen en wat daarvan de mogelijke consequenties zijn voor de geformuleerde veronderstellingen (paragraaf 4.6).

De opbouw van dit hoofdstuk is als volgt. Allereerst wordt in paragraaf 4.1 het verkeersproces verkend dat alle rotondes gemeen hebben. In de vertaling daarvan naar turborotondes is

[132] Tussen haakjes wordt steeds verwezen naar paragrafen in dit hoofdstuk waar het betreffende onderwerp aan de orde komt. Het gaat daarbij om aspecten die bij toepassing van een hiaatacceptatie-model voor de capaciteit van een turborotonde saillant zijn.

[133] Zie voor een toelichting van het begrip schijnconflict blz. 69.

essentieel, dat het strookgebruik in belangrijke mate is gedetermineerd door het relatiepatroon. Op basis daarvan worden vervolgens in paragraaf 4.2 beschikbare capaciteitsmodellen op hun bruikbaarheid verkend en worden enkele modificaties aangebracht. In paragraaf 4.3 *Onderzoeksopzet* wordt ingegaan op de rol die zowel de hiaatwaarnemingen als de capaciteitsmetingen in de modelschatting spelen. In paragraaf 4.4 *Kalibratie hiaatparameters* wordt de wijze waarop deze parameters worden geschat, toegelicht en volgt een bespreking van de uitkomsten. Paragraaf 4.5 behandelt de modelschatting op basis van capaciteitswaarnemingen inclusief de wijze waarop de geconstateerde verschillen met de schatting op basis van hiaatwaarnemingen wordt overbrugd. Paragraaf 4.6 sluit af met conclusies.

4.1 Basisconcept rotondecapaciteit

De capaciteit van een rotonde wordt bepaald door de capaciteit van de gezamenlijke toeritten, die op hun beurt weer worden beïnvloed door verkeersprocessen op de rotonde zelf. Gebruikelijk is om het moment waarop bij een groeiende intensiteit de capaciteit wordt bereikt op de meest verzadigde strook van een toerit, te duiden als het moment waarop een rotonde als geheel zijn capaciteit bereikt.

De capaciteit van een rotonde kan op verschillende aggregatieniveaus worden gedefinieerd. Vuistregels voor de onderlinge vergelijking van kruispuntvormen beschouwen de rotonde als één geheel. Dan wordt de som van de toerit-intensiteiten op het moment dat op één van de toeritten de capaciteit wordt bereikt, als de rotondecapaciteit aangeduid. Duidelijk is, dat in die definitie de rotondecapaciteit bij een andere richtingverdeling veel hoger of lager kan zijn.

Voor de onderlinge vergelijking van de verkeersprestaties van kruispuntvormen is ook een benadering nuttig waarin de relatie tussen het verkeer op twee conflicterende wegen wordt beschouwd. De takken van de weg met de zwaarste stroom worden als hoofdtakken aangeduid en die met de kleinste verkeersstroom als zijtakken. Gegeven een bepaalde richtingverdeling wordt dan de maximale intensiteit op de zwaarst belaste zijtak gerelateerd aan intensiteit op de zwaarst belaste hoofdtak (zie Figuur F.1-2). De sterke afhankelijkheid van de richtingverdeling maakt ook deze benadering ongeschikt voor een meer fundamentele beschouwing.

In een capaciteitsmodel voor een rotonde dient het gehele complex van de rotonde met takken opgenomen te zijn. Immers het verkeer op de andere takken bepaalt de verkeersbelasting van de rotonde tegenover een beschouwde tak. Maar de capaciteit per tak is de basis. Daarom staat in deze studie de analyse van de capaciteit van de rotondetoerit centraal.

4.1.1 Definitie van capaciteit

Capaciteit wordt gedefinieerd als het maximum aantal voertuigen dat een punt op een weg of een rijstrook gedurende een bepaalde periode onder de heersende weg- en verkeersomstandigheden kan passeren (Drew, 1968). Centraal staat een conflictpunt. Uitgangspunt is, dat de doorstroming van de voertuigen op het conflictpunt niet wordt

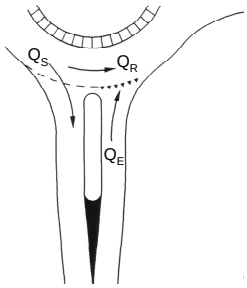
belemmerd door verstoringen benedenstrooms van het beschouwde conflictpunt, of wordt gelimiteerd door de weg- en verkeerssituatie bovenstrooms.
Wanneer ter plaatse van het conflictpunt twee gelijkwaardige verkeersstromen samenvoegen of elkaar kruisen is het gebruikelijk het begrip capaciteit te relateren aan de som van die beide stromen. Voorbeelden hiervan zijn het punt van samenvoeging van twee rijstroken naar één rijstrook en het conflictvlak van rijstroken waarop het verkeer onderling met verkeerslichten wordt geregeld. Kyte e.a. (1991) gebruiken deze benadering voor 'all-way stop controlled crossings' (AWSC), hoewel de capaciteitsformule uiteindelijk toch betrekking heeft op de beschouwde naderingstak.
Als de twee verkeersstromen niet gelijkwaardig zijn, maar de ene voorrang moet verlenen aan de andere, is het gebruikelijk het begrip capaciteit alleen te betrekken op het verkeer van de ondergeschikte weg −uiteraard gerelateerd aan de omvang van de verkeersstroom op de voorrangsweg als de belangrijkste verklarende variabele. Kimber (1980), Brilon (1988), Bovy (1990, 1991), Troutbeck (1984, 1986, 1993) en vele anderen passen deze benadering toe voor rotondes. De capaciteit is dan het aantal voertuigen dat de voorrangsmarkering gedurende een bepaalde periode kan passeren onder de heersende verkeersomstandigheden op de voorrangsweg, gegeven de kruispuntgeometrie. Zo wordt het begrip toeritcapaciteit in deze studie gebruikt.

4.1.2 Verkeersprocessen op de moderne enkelstrooksrotonde

Een rotonde waarop het rondgaande verkeer voorrang heeft, kan worden beschouwd als een serie T-aansluitingen. Gelet op de voorrangssituatie is het *rondgaande verkeer* of *circulerend verkeer* de *hoofdstroom* en het *toeritverkeer* vanaf de aansluitende rotondetak de *ondergeschikte stroom.*

Het verkeersproces op de moderne enkelstrooksrotonde kan als volgt worden benaderd (zie Figuur 4.1-1):

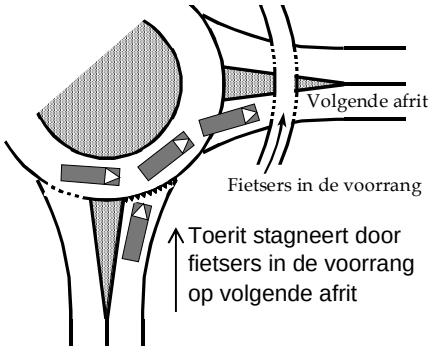
1) *Het gewone voorrangsconflict*. Verkeer op de toerit moet voorrang verlenen aan verkeer op de rotonde. Analoog aan een T-aansluiting, waar de doorgaande weg voorrang heeft, moeten verkeersdeelnemers van de aansluitende tak besluiten een aangeboden hiaat al dan niet te gebruiken.
2) *Het schijnconflict.* Dit betreft voertuigen die de rotonde verlaten, in het bijzonder als ze geen richting aangeven. Bestuurders van oprijdende voertuigen verwerpen dan ten onrechte een hiaat of accepteren het later.



Q_E is de intensiteit van de toerit (entering traffic); de capaciteitswaarde daarvan wordt aangeduid met C_E.
Q_R is de intensiteit op het rotondesegment voor de toerit.
Q_S is de intensiteit van de afslaande stroom, die een schijnconflict oplevert.

Figuur 4.1-1 Definiëring van verkeersstromen op (enkelstrooks)rotondes

3) *Het conflict op de toerit met langzaam verkeer*. Beoordeeld moet worden of een voetganger c.q. fietser voorrang heeft en (tegen de rijrichting op de rotonde in) al dan niet gaat oversteken.
4) Ten slotte een (lastig) *conflict op de afrit met langzaam verkeer* als dat voorrang heeft. Ook bij het verlaten van de rotonde moet beoordeeld worden of fietsers en voetgangers in de voorrang al dan niet gaan oversteken. Daar kunnen zij niet alleen motorvoertuigen belemmeren de rotonde te verlaten, maar daarmee ook een tijdelijke blokkering van de rotonde veroorzaken (zie Figuur 4.1-2).



Figuur 4.1-2 Conflict met langzaam verkeer bij afrit

Conflicttype 2) vormt een punt van extra aandacht. Het *afritverkeer* kan invloed hebben op het toeritverkeer van dezelfde rotondetak: bestuurders op de toerit verkeren in onzekerheid of een naderend voertuig de rotonde zal vervolgen of zal verlaten tot het punt waar de koerswijziging duidelijk is (*afritpunt*). Dit levert voor het toeritverkeer een schijnconflict op[134]. Van Arem (1992) verhoogt daarom de intensiteit van het rotondeverkeer met de helft van het afslaand verkeer. Bovy (1991) maakt in zijn model die invloed afhankelijk van de breedte van de middenberm. Erné (1995) heeft in Nederland experimenten uitgevoerd, waarmee het mogelijk was het effect van het schijnconflict na verandering van de breedte van de middenberm vast te stellen. Andere onderzoekers, zoals Kimber (1980), Brilon e.a. (1993, 2004), Troutbeck (1993) en Hagring (1998) hebben van het kwantificeren van dit effect afgezien. Akçelik (1999) laat in SIDRA de mogelijkheid open om een percentage van het afslaande verkeer te voegen bij het rotondeverkeer, maar heeft de waarde daarvoor standaard op nul staan. Gelet op de vorm van de Nederlandse rotonde – met radiaal aansluitende takken– , zal in deze studie aan dit aspect expliciet aandacht worden besteed. In paragraaf 4.4.2 (blz.97) wordt de complicerende rol van het afslaande verkeer in de hiaatbepaling toegelicht.

Vanwege de kleine afstanden vertonen de conflicttypen 3) en 4) qua beslissingsproces enige overeenkomst met conflicttype 2): niet altijd is duidelijk of een fietser werkelijk de rijbaan zal kruisen. Als fietsers en/of voetgangers in de voorrang zijn opgenomen, kan conflicttype 4) in het geval van overbelasting ook terugstuwing op de rotonde veroorzaken, waardoor ook de toevoer naar de rotonde wordt geblokkeerd. Dan wordt de procesbenadering veel ingewikkelder. Vanwege afdekproblemen lopen fietsers een verhoogd veiligheidsrisico als ze op toe- en afritten van turborotondes in de voorrang worden opgenomen (zie Bijlage D.6.3).

[134] In de loop van de studie is gebleken, dat het voor de beoordeling van het schijnconflict waarschijnlijk ook van belang is, of de afslaande auto al dan niet afkomstig is van de voorliggende aansluitende tak. In de onderzoeksopzet is daarmee geen rekening gehouden. Wel is een benadering van het effect daarvan mogelijk gebleken. Zie de paragrafen 4.2.8, 4.5.2 en 4.5.3.

Daarom blijven situaties waarin voetgangers en fietsers in de voorrang zijn opgenomen (conflicttype 3 en 4) verder in dit hoofdstuk buiten beschouwing. Bovendien waren er ten tijde van het veldonderzoek geen turborotondes met fietsers in de voorrang aanwezig die geschikt zijn voor capaciteitsmetingen. Vermoed kan worden, dat ook in situaties waarin fietsers niet in de voorrang zijn opgenomen, deze de capaciteit voor het autoverkeer enigszins zullen reduceren, omdat op enkelstrooksrotondes binnen de bebouwde kom fietsers veelal voorrang hebben (De Leeuw e.a. 1999). Op de onderzochte situaties was óf geen fietsverkeer aanwezig óf de hoeveelheid zeer klein, zodat in deze studie hierover geen uitspraak kan worden gedaan.

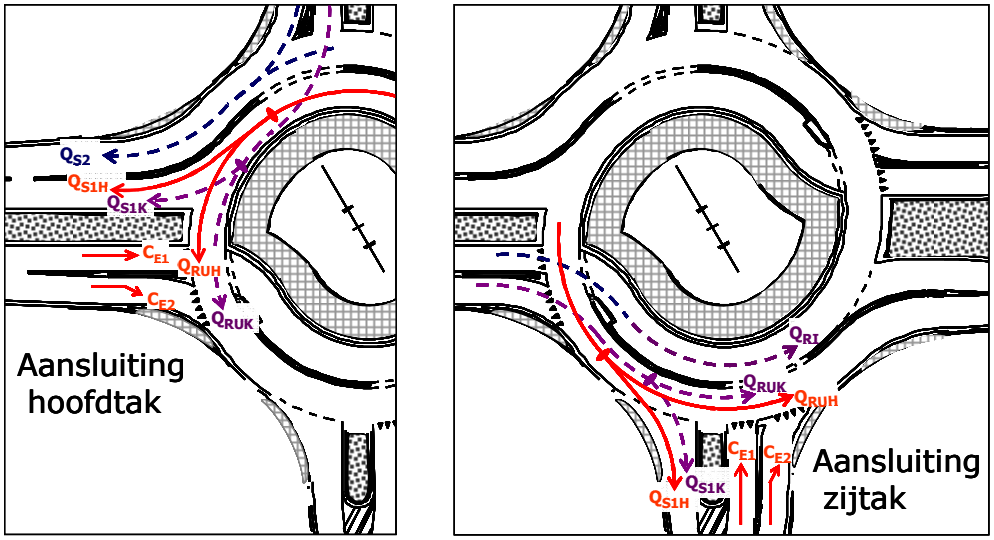
De herkomst-bestemmingsverdeling op een rotonde speelt alleen een rol in de verkeersbelasting van de rotondesegmenten. Echter, de herkomst-bestemmingsverdeling kan ook van invloed zijn op de wijze waarop de hiaten in de verkeersstroom op een segment verdeeld zijn. De toeritcapaciteit wordt negatief beïnvloed als de verkeersbelasting op het betreffende segment in belangrijke mate afkomstig is van een dominante verkeersstroom vanaf één van de andere takken (Akçelik, 1999). Ook hebben bovenstrooms gelegen verkeerslichten invloed op de capaciteit (Akçelik a.w. blz. 19), omdat ze van invloed zijn op de mate waarin voertuigen op de rotonde geclusterd rijden. Op tweestrooksrotondes kan het effect daarvan nog worden versterkt doordat hiaten – die in de binnenste en buitenste rotondestrook vaak niet samenvallen – door een verkeerslicht worden gegroepeerd tot één groot ‘hiaat’ op beide rotondestroken. De kwantificering van deze effecten valt echter buiten de scope van deze studie. Simulatiemodellen lenen zich er in principe voor om dergelijke effecten te onderzoeken, mits het volggedrag zowel bij het oprijden als bij het berijden van de rotonde goed wordt beschreven.

4.1.3 Verkeersprocessen op de turborotonde

Figuur 4.1-3 geeft de situatie weer bij de aansluiting van zowel de hoofdtak als de zijtak op de turborotonde. In alle gevallen is er sprake van een gewoon voorrangsconflict en een schijnconflict (zie par. 4.1.2). Afhankelijk van de gebruikte strook verschilt de tijd waarin de bestuurder zekerheid heeft of een auto al dan niet afslaat. Naast het groter aantal stroken is ten opzichte van de enkelstrooksrotonde een extra complicerende factor, dat ook onderscheiden moet worden welke voertuigen in het geheel geen conflict opleveren (Q_{S2} voor nadering vanaf de hoofdtak en Q_{RI} bij nadering vanaf de rechter toerit van de zijtak).

4.1.4 Verschil tussen turborotonde en compacte concentrische tweestrooksrotonde

Een turborotonde is zo ontworpen, dat strookwisselingen op de rotonde niet nodig zijn en door de scheidingsband ook zeer zelden voorkomen. Afgezien van het belang hiervan voor de veiligheid, is daarvan ook een positief effect voor de capaciteit te verwachten. Immers, in tegenstelling tot de compacte, concentrische tweestrooksrotonde – die uit veiligheids-overwegingen voorzien is van enkelstrooks afvoertakken – hoeft het verkeer vanaf de binnenste rotondestrook niet te weven met het verkeer op de buitenste rotondestrook. Een betere verdeling van de verkeersstromen over de twee toeritstroken van de hoofdtak zal hiervan het gevolg zijn, wat naar verwachting tot een hogere capaciteit leidt.
Door een evenwichtiger verdeling van het verkeer over de twee rotondestroken zal ook de capaciteit vanaf de linker toeritstrook van de zijtak hoger zijn.



Figuur 4.1-3 Definities van verkeersstromen basis turborotonde

Legenda bij Figuur 4.1-3

Strookaanduiding

Aanvoertak: linker toeritstrook: *E1*; rechter toeritstrook: *E2*
Aanliggende afvoertak: linker afritstrook: *S1*; rechter afritstrook: *S2*
Rotonde: buitenste rotondestrook die de toerit kruist: *RU*
binnenste rijstrook die de toerit kruist: *RI*.

Stroomaanduiding

Toeritverkeer: C_E: toeritcapaciteit, eventueel gevolgd door de indices 1 of 2 die de nummering van de rijstroken weergeven, gerekend vanaf de middengeleider.

Rondgaand verkeer: Q_R: omvang van het rondgaande verkeer. Als de letter *U* is toegevoegd gaat het om verkeer op de buitenste of enige rotondestrook en de letter *I* om verkeer op de binnenste rotondestrook. Soms is aan Q_{RU} de index *H* of *K* toegevoegd om de herkomst aan te duiden: *H* =half segment; *K*= kwart segment (afkomstig van de voorliggende aansluittak).

Afslaand verkeer: Q_S: omvang van het afslaand rotondeverkeer. Als index 1 is toegevoegd gaat het om de linker afritstrook en bij 2 om de rechter afritstrook (ook genummerd vanaf de middengeleider). Soms is aan Q_{S1} de index *H* of *K* toegevoegd om de herkomst aan te duiden: *H* =half segment; *K*= kwart segment (afkomstig van de voorliggende aansluittak). Oorspronkelijk is geen onderscheid gemaakt naar de herkomst van de verkeersstromen, maar in de loop van de studie bleek dat wel wenselijk.

Voorbeelden combinatie stroom en strookaanduiding

Q_{E1}: Oprijdend verkeer vanaf de linker rijstrook van de toerit
Q_{E2}: Oprijdend verkeer vanaf de rechter rijstrook van de toerit
Q_{RU}: Circulerend verkeer op de buitenste rotondestrook; $Q_{RU} = Q_{RUK} + Q_{RUH}$
Q_{RI}: Circulerend verkeer op de binnenste rotondestrook (alleen bij zijtak)
Q_{S1}: Uitvoegend verkeer vanaf de rotonde naar de linker rijstrook van de afrit: $Q_{S1}=Q_{S1H}+ Q_{S1K}$
Q_{S2}: Uitvoegend verkeer vanaf de rotonde naar de rechter rijstrook van de afrit (alleen bij hoofdtak).

Verder mogen bestuurders vanaf de rechter toeritstrook van de zijtak er redelijkerwijze van uitgaan, dat voertuigen op de binnenste rotondestrook voor hen geen conflict opleveren. Dit betekent dat het verkeer op de binnenste rotondestrook geen constituerende rol speelt in de capaciteit van de rechter toeritstrook van de zijtak.

4.1.5 Resulterende veronderstellingen

De voorgaande discussie leidt tot de volgende veronderstellingen, die in het vervolg van dit hoofdstuk worden onderzocht:

1. De invloed van het verkeer op de binnenste rotondestrook is voor de hiaatacceptatie vanaf de rechter toeritstrook van de zijtak beperkt. (Deze veronderstelling wordt onderzocht in paragraaf 4.4.2.)
2. Een meer evenwichtige verdeling van het verkeer over beide rotondestroken verhoogt de capaciteit van de zijtak. (Deze veronderstelling wordt onderzocht in paragraaf 4.5.4.)
3. De hoofdtak van een turborotonde heeft bij een dominante rechtdoorgaande stroom een hogere capaciteit dan een aanvoertak van een concentrische tweestrooksrotonde. (Deze veronderstelling wordt onderzocht in paragraaf 4.5.6.)

Om deze veronderstellingen te toetsen is het noodzakelijk het verkeer per rotondestrook en toeritstrook afzonderlijk te beschouwen. Dit is bepalend voor de opzet van het veldonderzoek en het te gebruiken capaciteitsmodel.

4.2 Typen capaciteitsmodellen

In het verleden zijn verschillende modellen ontwikkeld om de capaciteit te berekenen. Deze modellen kunnen worden ingedeeld in drie hoofdtypen:

a) ‘conflict-stroommodellen’ (door Hagring, 1998, aangeduid als ‘traffic stream models’);
b) hiaatacceptatie-modellen (gap acceptance models);
c) simulatiemodellen.

De onder a) en b) genoemde modellen worden gerekend tot de analytische modellen. In dit type capaciteitsmodellen blijft het tijdsaspect buiten beschouwing. Het begrip simulatiemodel wordt in de verkeerskundige praktijk gebruikt voor modellen, waarin het verkeersproces in de tijd – zij het versneld– wordt nagebootst. Simulatiemodellen maken – ter beperking van de omvang– geen onderdeel uit van dit proefschrift.

4.2.1 Conflict-stroommodellen

Conflict-stroommodellen beschrijven de capaciteit van een toerit op verkeersstroomniveau: de capaciteit van een toerit wordt rechtstreeks gerelateerd aan de intensiteit van de conflicterende hoofdstroom. Daarbij kan ook nog met andere factoren rekening worden gehouden. In de meest eenvoudige vorm luidt een dergelijk model:

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

Hierin is F de constante en f_C de helling van de functie[135].

Voor het vaststellen van de parameters in een conflict-stroommodel is het nodig, dat rotondes in capaciteitssituaties worden onderzocht. Daarom wordt een dergelijk model ook getypeerd

[135] Een overzicht van de symbolen die in dit hoofdstuk worden gebruikt is opgenomen als Bijlage A.3.

als ‘empirisch model’. Veelal wordt daarbij uitgegaan van lineaire regressie. Kimber & Semmens (1977) hebben deze benadering al toegepast voor de capaciteit van de toevoertakken naar de moderne rotonde[136]. De waarden van F en f_C kunnen zelf weer afhangen van een groot aantal factoren, zoals geometrische kenmerken (Kimber, 1980). In Engeland (TRRL-rapporten SR 334, SR 436, SR 554, LR 940, LR 942) heeft men zich in het onderzoek vooral gericht op ontwerpkenmerken, zonder rekening te houden met de invloed van het schijnconflict.

In het model van Philippe H. Bovy (1991) wordt wel rekening gehouden met het schijnconflict, veroorzaakt door de stroom Q_{S1} die de rotonde via de aanliggende afvoertak verlaat (zie de legenda bij Figuur 4.1-1):

$$C_E = \frac{1}{\gamma}\left[C_0 - \frac{8}{9}\left(\beta \cdot Q_R + \alpha \cdot Q_S\right)\right] \tag{4.2}$$

Hierin is:

C_0 : capaciteit van een toeritstrook zonder verkeer op de rotonde in personenauto-equivalenten per uur, in de formule van Bovy voor een enkelstrooks toerit vastgelegd op 1500 [pae/h]
C_E : capaciteit van de toerit (alle stroken samen) [pae/h]
Q_R : intensiteit circulerend verkeer op de rotonde [pae/h]
Q_S : intensiteit van het uitvoegend verkeer naar de afrit naast de toerit [pae/h]
α : invloed van het afslaande verkeer op de toeritcapaciteit
β : invloed circulerend verkeer op de toeritcapaciteit
γ : invloed van het aantal stroken op de toerit.

(Zie voor de parameterwaarden Bijlage F1.1).

Daarbij zijn de volgende pae-waarden aangehouden:
1 fiets = 0,5 pae
1 vrachtauto = 2,0 pae

Dit model heeft als basis gediend voor de Meerstrooksrotondeverkenner (Fortuijn, en Harte, 1997). Door de auteur is dit model gemodificeerd om rekening te kunnen houden met de invloed van de verdeling van het verkeer over de twee rotondestroken.

$$C_{E1} = C_{01} - b_{zwaar} \cdot Q_{zwaar} - b_{licht} \cdot Q_{licht} - a_{1,S1} \cdot Q_{S1} \tag{4.3}$$

De vergelijkingen voor de linker toeritstrook naar het enkelstrooks segment luidt:

$$C_{E1} = C_{01} - b_1 \cdot Q_R - a_{1,S1} \cdot Q_{S1} \tag{4.4}$$

En naar de rechter toeritstroken:

$$C_{E2} = C_{02} - b_2 \cdot Q_{RU} - a_{2,S1} \cdot Q_{S1} \tag{4.5}$$

Hierin is:

C_{E1} : capaciteit van de linker toeritstrook in personenauto-equivalenten per uur [pae/h]
C_{E2} : capaciteit van de rechter toeritstrook in personenauto-equivalenten per uur [pae/h]
$C_{0\,1}$: capaciteit van de linker rijstrook van de toerit zonder verkeer op de rotonde [pae/h]
Q_{Rzwaar} : intensiteit op de zwaarst belaste rotondestrook [pae/h]
Q_{Rlicht} : intensiteit op de lichtst belaste rotondestrook [pae/h]
Q_{S1} : intensiteit van het schijnconflict op de linker (of enige)strook van de afrit [pae/h]
Q_{S2} : intensiteit van het schijnconflict op de rechter rijstrook van de afrit [pae/h]

[136] Dat wil zeggen rotondes met *offside priority*, zie voetnoot 32.

b_{zwaar} : invloed van het verkeer op de zwaarst belaste rotondestrook op de capaciteit van de linker rijstrook van de toerit

b_{licht} : invloed van het verkeer op de lichtst belaste rotondestrook op de capaciteit van de linker rijstrook van de toerit

b_1 : invloed van het verkeer op de buitenste (of enige) rotondestrook op de capaciteit van de linker rijstrook van de toerit

b_2 : invloed van het verkeer op de buitenste (of enige) rotondestrook op de capaciteit van de rechter rijstrook van de toerit

$a_{1,S1}$: invloed van het afslaande verkeer op de linker rijstrook van de afrit naast de toerit (S1) op de capaciteit van de linker rijstrook van de toerit (E1)

$a_{2,S1}$: invloed van het afslaande verkeer op de linker rijstrook van de afrit naast de toerit (S1) op de capaciteit van de rechter rijstrook van de toerit (E2).

Dit model wordt aangeduid als Bovy^T. De relatie met het oorspronkelijke model van Bovy wordt toegelicht in Bijlage F.1.1. In het vervolg van deze studie zal blijken, dat de lineaire structuur van vergelijking (4.3) niet in staat is om het effect van de verdeling van het verkeer over twee rotondestroken goed te beschrijven (zie paragraaf 4.5.3). Uit de theoretische achtergrond die aan meerstrooks hiaatacceptatie-modellen ten grondslag ligt, blijkt dat daarvoor een multiplicatieve functie nodig is (zie paragraaf 4.2.7).

4.2.2 Basisconcept hiaatacceptatie-modellen

Evenals de conflict-stroommodellen beschrijven de hiaatacceptatie-modellen de capaciteit van de aanvoertak op stroomniveau. Maar, in tegenstelling tot de eerstgenoemde categorie, wordt daarbij gebruik gemaakt van proceskarakteristieken op het niveau van de verkeersdeelnemer:

- de volgtijden van verkeersdeelnemers op de rotonde, vertaald in een kansdichtheidfunctie van aangeboden hiaten[137)];
- de grootte van hiaten in de rotondestroom die de verkeersdeelnemers vanaf de aansluitende tak verwerpen of accepteren, en
- de volgtijd die verkeersdeelnemers in acht nemen bij het oprijden van de rotonde.

Deze karakteristieken worden dan op geaggregeerde wijze in modelparameters gebruikt. Het verschijnsel dat bestuurders bepaalde hiaten wel of niet gebruiken wordt bijvoorbeeld op geaggregeerd niveau samengevat in het begrip ‘kritisch hiaat’. In hiaatacceptatie-modellen worden eigenschappen van de voertuigen (afmetingen, acceleratie en deceleratie) buiten beschouwing gelaten. Ook speelt de snelheid geen inherente rol, maar is het een (soms expliciet onderscheiden) klassekenmerk.

Een algemeen wiskundige formulering voor de toeritcapaciteit luidt (Troutbeck en Brilon, z.j.):

[137] Strikt genomen is het beschikbare hiaat de tijd tussen het passeren van de achterkant van de ene auto en de voorkant van de volgende auto. Maar om in de analytische modellen de relatie tussen intensiteit en hiaatverdeling zo eenvoudig mogelijk te houden, wordt gerekend met het ‘bruto’ hiaat, dat overeenkomt met de volgtijd: de tijd tussen het passeren van de achterkant van de ene auto en de achterkant van de volgende auto. Als vanuit het gezichtspunt van de conflicterende stroom naar de volgtijd wordt gekeken, spreekt men over het algemeen in de Engelstalige literatuur toch over ‘gap’ (overeenkomend met het Nederlandse ‘hiaat’), waarmee dan het bruto hiaat wordt bedoeld. Overigens heeft het gebruik van de woorden ‘bruto’ en ‘netto’ in paragraaf 4.4.2 een andere betekenis.

$$C_E = 3600\, q_R \int_0^\infty f(t)\, g(t)\, dt \qquad (4.6)$$

Hierin is:

C_E : capaciteit van de toerit in voertuigen c.q. in personenauto-equivalenten (pae) per uur [vtg/h of pae/h]

q_R : de intensiteit van het rotondeverkeer in voertuigen (of pae) per seconde [vtg/s of pae/s]

f(t) : de kansdichtheidfunctie van de hiaten in de verkeersstroom waaraan voorrang moet worden verleend (met als belangrijkste parameter de intensiteit q_R)

g(t) : functie voor het aantal voertuigen vanaf de toerit dat kan invoegen in een hiaat in de hoofdstroom van de grootte *t* (met als parameters het kritisch hiaat t_C, de oprijvolgtijd t_F en de minimum volgtijd t_M).

Afhankelijk van de aannamen voor de functies *f(t)* en *g(t)* ontstaan de verschillende capaciteitsmodellen.

4.2.3 Hiaatverdeling in de rotondestroom *f(t)*

M1-verdeling: aankomsten volgens Poissonverdeling

De eenvoudigste aanname hiervoor is, dat de aankomsten Poissonverdeeld zijn, wat inhoudt dat de voertuigen onafhankelijk van elkaar in een toevalsproces (random) vertrekken. Dan zijn de hiaten onafhankelijk van elkaar verdeeld, wat een negatief exponentiële verdeling voor de volgtijden (hiaten) in de hoofdstroom oplevert. Harders (1968) en Siegloch (1973) gaan daar in hun modellen van uit. Brilon & Stuwe (1991, 1993) en Brilon & Bäumer (2004) maken gebruik van het model van Siegloch, maar dan met parameters geschat op stroomniveau. De kansdichtheidfunctie voor de hiaatverdeling ziet er dan als volgt uit:

$$f(t) = \frac{d[P(h \le t)]}{dt} = qe^{-qt} \qquad (4.7)$$

en de cumulatieve kansverdeling: $P(h \le t) = 1 - e^{-qt}$ (4.8)

Hierin is:

f(t) : de kansdichtheidfunctie van de hiaten in een verkeersstroom

P(h≤t): de kans dat een hiaat *h* kleiner is dan een tijdsinterval *t*

q : de intensiteit van het rotondeverkeer in voertuigen per seconde of personenauto-equivalenten per seconde [vtg/s of pae/s] [138].

Cowan (1975) noemt deze functie voor de hiaatverdeling model 1, afgekort tot M1. Cowan onderscheidt verder twee modellen (M2 en M3) waarin rekening wordt gehouden met een minimum volgtijd t_M en een vierde model (M4) met ook een stochastische verdeling van volgtijden voor geclusterde voertuigen.

M2-verdeling: hiaten verschoven exponentieel verdeeld zonder clustering

Model M2 kent een verschoven exponentiële verdeling (met verschuiving t_M) voor de hiaatverdeling:

$$\left.\begin{array}{ll} P(h \le t) = 1 - e^{-\lambda(t - t_M)} & als\ t \ge t_M \\ \text{en} \quad P(h \le t) = 0 & als\ t < t_M \end{array}\right\} \qquad (4.9)$$

[138] Uiteraard zijn voertuigen en personenauto-equivalenten geen fysische grootheden. De aantallen hebben in strikte zin dus geen dimensie. Maar voor praktisch gebruik in de verkeerstheorie is het handzaam om vtg en pae toch als 'dimensie' te gebruiken, zodat ook de omrekenfactoren helder zijn.

$$\text{waarin } \lambda = \frac{q}{1 - t_M \cdot q} \tag{4.10}$$

Hierin is:

t_M : minimum volgtijd in de verkeersstroom op de rotonde [s/vtg of s/pae]

Dit model houdt er echter geen rekening mee dat, uitgaande van een willekeurige (random) generatie, een minimum volgtijd alleen bereikt kan worden door sommige vertrekken even op te houden, waardoor tegelijkertijd clustering optreedt. Voor het beschrijven van een verkeersproces heeft het M2-model dan ook geen praktische betekenis.

M3-verdeling: verkeer is verdeeld in een geclusterd en ongeclusterd deel

Model M3 van Cowan houdt wel rekening met clustering van het verkeer. Dit model van Cowan wordt algemeen geaccepteerd voor gebruik in geaggregeerde capaciteitsmodellen. In het ongeclusterde deel (φ) van de verkeersstroom zijn de hiaten dan verdeeld volgens een verschoven exponentiële verdeling, rekening houdend met de minimum volgtijd t_M.
De kansdichtheidfunctie van de Cowan M3-hiaatverdeling luidt:

$$\left.\begin{aligned} f(t) &= \varphi \lambda e^{-\lambda(t - t_M)} && als\ t > t_M \\ f(t) &= 1 - \varphi && als\ t = t_M \\ f(t) &= 0 && als\ t < t_M \end{aligned}\right\} \tag{4.11}$$

En de cumulatieve kansverdeling:

$$\left.\begin{aligned} P(h \le t) &= 1 - \varphi\ e^{-\lambda(t - t_M)} && als\ t \ge t_M \\ \text{en} \quad P(h \le t) &= 0 && als\ t < t_M \end{aligned}\right\} \tag{4.12}$$

$$\text{waarin } \lambda = \frac{\varphi \cdot q}{1 - t_M \cdot q} \tag{4.13}$$

λ : clustering-gecorrigeerde intensiteit van de hoofdstroom (rotonde-intensiteit), d.w.z. de intensiteit gecorrigeerd voor bovenproportionele clustervorming[139] uitgedrukt in voertuigen of personenauto-equivalenten per seconde [vtg/s of pae/s]

φ : proportie vrije voertuigen op rotonde (ongeclusterd verkeer).

t_M : minimum volgtijd in de verkeersstroom op de rotonde [s/vtg of s/pae]

Troutbeck (1984), Hagring (1996), Wu (1997) en Akçelik (1999) passen de M3-functie toe in hun capaciteitsmodellen voor rotondes. Tanner (1962) heeft eerder een capaciteitsmodel ontwikkeld, waarin de functie *f(t)* kan worden geïnterpreteerd als een speciaal geval van deze verdeling. Het clusteringprincipe speelt ook een rol in de beschrijving van de verdeling van het verkeer over meer dan één rotondestrook, ervan uitgaande dat het rijstrookgebruik willekeurig (random) tot stand komt. Te noemen zijn de modellen van Tanner (1967, Troutbeck (1986), Fisk (1989), Hagring (1996, 1998) en Wu (1997, 2003).

M4-verdeling: volgtijden geclusterd verkeer stochastisch

De verdeling die Cowan aanduidt met M4, beschrijft ook de verdeling van het geclusterde verkeer. De beschikbare hiaatacceptatie-modellen gaan ervan uit, dat hiaten waarin het verkeer geclusterd rijdt, niet worden benut, zodat op de M4-verdeling hier niet nader wordt ingegaan.

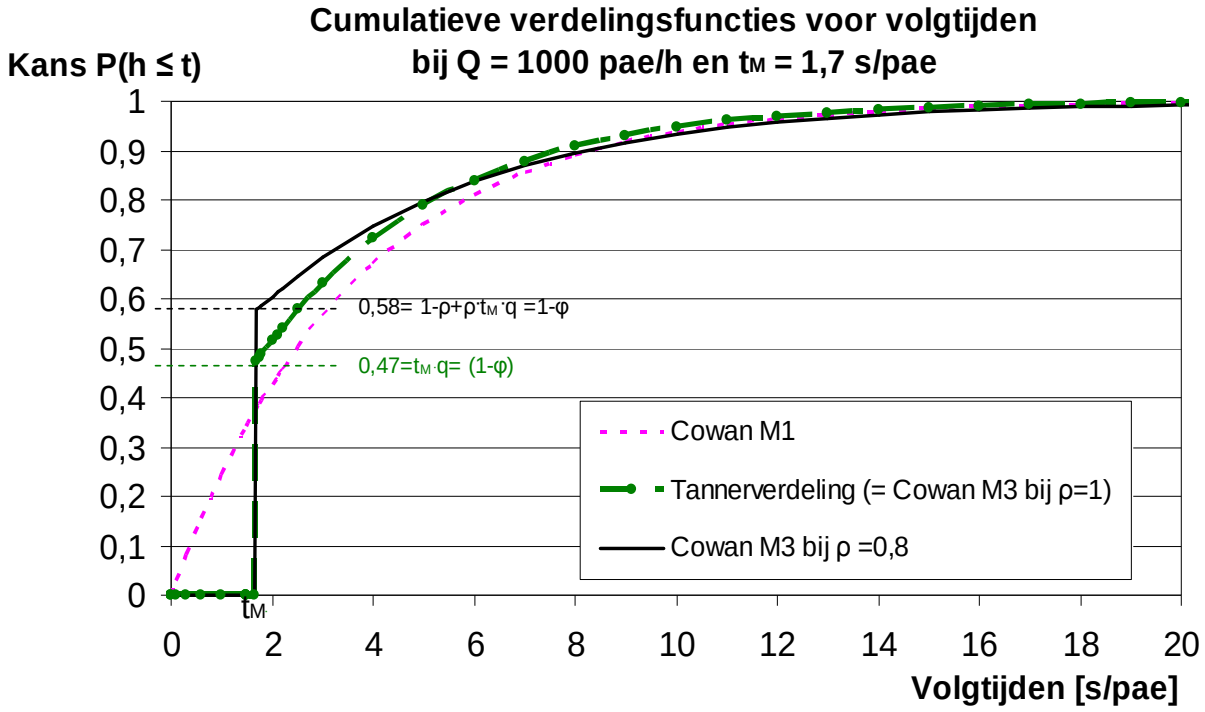
[139] Verderop in deze paragraaf wordt de keuze voor deze naam toegelicht.

Conclusie literatuurverkenning

Het merendeel van de gangbare analytische capaciteitsmodellen – met uitzondering van het model van Siegloch, zie paragraaf 4.2.6 – neemt de M3-verdeling als uitgangspunt. In deze studie wordt daarvan niet afgeweken. Aandacht zal worden geschonken aan de beperkingen die met de daarbij gehanteerde veronderstellingen samenhangen.

Vereenvoudigde formule voor het aandeel vrij verkeer in de M3-verdeling

Troutbeck (1986) heeft opgemerkt dat het capaciteitsmodel van Tanner kan worden verkregen door in Cowan M3 voor φ in te vullen: $\varphi = 1 - t_M \cdot q$. De waarde $\varphi = 1 - t_M \cdot q$ is niet een willekeurige waarde. Uitgaande van een random aankomstproces en een minimum volgtijd t_M is $1 - \varphi = t_M \cdot q$ het minimum aandeel geclusterd verkeer dat kan optreden (Fortuijn, 2009b). Daarom wordt in deze studie die verdeling van het rotondeverkeer aangeduid als de 'Tannerverdeling'.



Figuur 4.2-1 Cumulatieve verdeling van de volgtijden in de modellen Cowan M1 en M3 vergeleken met de 'Tannerverdeling'

Troutbeck (1989) heeft voorgesteld uit te gaan van een lineair verband tussen φ en q:

$$\varphi = \rho - b \cdot q \qquad (4.14).$$

Ook Hagring (1998) past die benadering toe. Omdat al het verkeer geclusterd rijdt als de capaciteit wordt bereikt ($\varphi = 0$ als $q = 1/t_M$), geldt: $b = \rho \cdot t_M$.

Formule (4.14) gaat dan over in:

$$\varphi = \rho \cdot (1 - t_M \cdot q) \text{ mits } \varphi \leq 1, \text{ anders } \varphi = 1 \qquad (4.15)$$

Vergelijking (4.13) kan dan worden vereenvoudigd tot: $\lambda = \rho \cdot q$ (4.16)

Hierin is ρ de clusteringconstante, die aangeeft in hoeverre het aandeel geclusterd verkeer afwijkt van de verdeling waarvan Tanner in zijn afleiding is uitgegaan. Tegen deze achtergrond wordt λ in deze studie geïnterpreteerd als de intensiteit gecorrigeerd voor

clustering. 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. Een waarde $\rho > 1$ verhoogt fictief de rotonde-intensiteit, omdat de hiaten in het aandeel φ –dan oneigenlijk aangeduid als de proportie[140] 'vrij rijdende voertuigen' – in werkelijkheid niet exponentieel verdeeld zijn (zie Bijlage F.1.2). Figuur 4.2-1 geeft een beeld van de cumulatieve hiaatverdelingen die in capaciteitsformules worden gebruikt. Zie voor een nadere analyse van de effecten van de afwijkingen van de M3-verdeling Bijlage F.1.2.

4.2.4 Hiaatbenuttingsfuncties *g(t)*

De hiaatbenutting kan op verschillende manieren in een functie worden weergegeven. Tanner (1962) en Harders (1968) gebruikten een discrete functie; Siegloch (1973) benaderde de hiaatbenutting via een continue functie.
De discrete functie voor de hiaatbenutting die Tanner en Harders gebruiken, kan worden weergegeven als:

$$g(t) = \begin{cases} 0 & \text{voor } t < t_C \\ n & \text{waarbij geldt } n \in N, \text{ zodanig dat } t_C + (n-1)\cdot t_F \leq t < t_C + n\cdot t_F \end{cases} \quad (4.17)$$

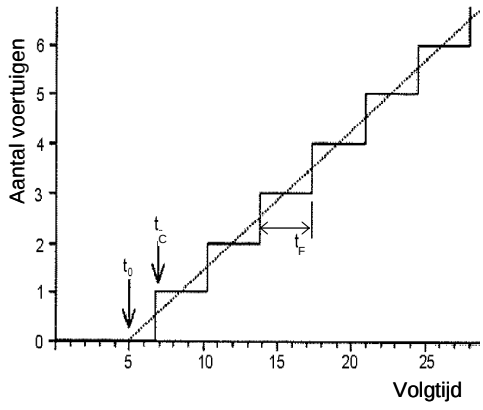
De continue functie die Siegloch gebruikt, luidt:

$$g(t) = \begin{cases} 0 & \text{voor } t \leq t_0 \\ \dfrac{t - t_0}{t_F} & \text{voor } t > t_0 \end{cases} \quad (4.18)$$

Hierin is:

n : geheel getal voor het aantal auto's dat van een bepaald hiaat gebruik maakt
g(t) : hiaatbenuttingsfunctie die het aantal voertuigen (*n*) in de ondergeschikte verkeersstroom weergeeft, dat gebruik kan maken van een hiaat van de grootte *t*
t_0 : het nulhiaat als benadering voor het kritisch hiaat in een continue hiaatbenuttingsfunctie [s/vtg of s/pae]
t_C : kritisch hiaat, gerekend van voorkant tot voorkant voertuig [s/vtg of s/pae]
t_F : oprijvolgtijd toeritverkeer: gemiddelde volgtijd in het peloton auto's dat bij een wachtrij op een toeritstrook bij een groter hiaat in het rotondeverkeer achter elkaar de rotonde oprijdt [s/vtg of s/pae].

Als voor $t_0 = t_C - t_F/2$ wordt ingevuld, benaderen beide functies elkaar.



Figuur 4.2-2 Verschillende typen hiaatbenuttingsfuncties

[140] De parameter φ heeft dan geen andere betekenis dan het aandeel voertuigen met een volgtijd $t > t_M$.

Kritisch hiaat

In het concept van hiaatacceptatie-modellen speelt het begrip *kritisch hiaat* (t_C) een cruciale rol. Auteurs hanteren hiervoor verschillende definities. Hier wordt de definitie van Brilon, Koenig en Troutbeck (1997) gevolgd, die het kritisch hiaat omschrijven als het 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.

In de capaciteitsmodellen wordt een discrete waarde voor het kritisch hiaat gehanteerd, zoals in beeld gebracht in Figuur 4.2-2. In werkelijkheid gaat het om een stochastische variabele. Een complicerende factor daarbij is, dat het kritisch hiaat (t_C) niet kan worden gemeten, maar moet worden afgeleid uit de verworpen en geaccepteerde hiaten. Door verschillende auteurs is hiervoor een grote diversiteit aan methoden ontwikkeld. Miller (1972) heeft er negen geëvalueerd, en geconcludeerd dat de methode van Ashworth & Lawrence (1978) – met als uitgangspunt dat t_C en t_F normaal verdeeld zijn – en de maximum likelihood schattings-methode de beste resultaten opleverden. De eerder genoemde studie van Brilon e.a. (1997) concludeert op basis van simulatieberekeningen, dat de methode van Ashworth et al. weliswaar stabiele waarden voor t_C oplevert bij variatie van het verkeersvolume, maar dat die systematisch te laag zijn. Wel werden goede resultaten bereikt met een maximum likelihood schattingsmethode waarin uitgegaan wordt van een log-normale verdeling van het kritisch hiaat van verschillende bestuurders, en met de methode van Hewitt. In deze studie zal gebruik worden gemaakt van de maximum likelihood schattingsmethode voor het bepalen van het kritisch hiaat op grond van de waargenomen geaccepteerde en verworpen hiaten, uitgaande van een log-normale verdeling.

Oprijvolgtijd

Een andere belangrijke factor die de capaciteit van de ondergeschikte stroom bepaalt, is de tijdsafstand tussen voertuigen die vanaf de aansluitende tak achter elkaar – gebruik makend van hetzelfde hiaat in de hoofdstroom – het conflictvlak oprijden. Deze volgtijd wordt bepaald door de fysieke afmetingen van de voertuigen en de minimum afstanden waarmee bestuurders hun voorliggers volgen. De benodigde tijdsafstand wordt aangeduid als de *oprijvolgtijd* (t_F).
De oprijvolgtijd (t_F) kan in de praktijk worden gemeten, zodat de verdelingsfunctie kan worden vastgesteld. Een praktische moeilijkheid is daarbij wel om bij grotere volgtijden vast te stellen wanneer er nog sprake is van een oprijvolgtijd of een volgtijd van een auto die al op de aanvoertak naderde maar zich (nog) niet had aangesloten bij zijn voorganger.

4.2.5 Basisveronderstellingen hiaatacceptatie-modellen

In de hiaatacceptatie-modellen worden assumpties gedaan zowel met betrekking tot de hiaatacceptatie als het hiaataanbod. Deze basisveronderstellingen bieden inzicht in de mogelijke oorzaken van systematische afwijkingen tussen de gemeten capaciteiten en de op basis van hiaatwaarnemingen berekende capaciteiten.

Aan het concept van het *kritisch hiaat* liggen de volgende assumpties ten grondslag:

1) De bestuurders zijn in hun gedrag consistent, dat wil zeggen dat een bestuurder met een specifiek kritisch hiaat t_C nooit een kleiner hiaat zal accepteren of een groter verwerpen.

De mate waarin bestuurders consistent reageren laat zich in de kalibratiefase onderzoeken (paragraaf 4.4.2 op blz. 99).

2) De populatie bestuurders is homogeen, dat wil zeggen alle bestuurders gedragen zich gelijk, althans in die zin dat ze allen een kritisch hiaat kiezen volgens dezelfde kansverdelingfunctie(paragraaf 4.4.2 op blz. 100). De validatieresultaten kunnen aanwijzingen opleveren in hoeverre de assumptie dat de populatie bestuurders homogeen is, een overschatting van de capaciteit oplevert (de waarden van de parameters δ *of* ξ en ψ in vergelijking (4.35) op blz. 90).

Bij het *aanbod van hiaten* spelen drie andere assumpties een rol:

3) Aan de M3-verdeling van het rotondeverkeer ligt de assumptie ten grondslag, dat de hiaten in het ongeclusterde deel van het rotondeverkeer – meer specifiek voor de hiaten groter dan het kritisch hiaat ($t > t_C$) – verschoven-exponentieel zijn verdeeld. Omdat de waarden van het kritisch hiaat bij het oprijden van de Nederlandse rotonde klein zijn, terwijl sommige bestuurders op de rotonde ook al bij een volgtijd $t > t_M$ door hun voorligger zijn beïnvloed, is de geldigheid van deze assumptie kwestieus, terwijl er ook nog toevallige invloeden kunnen optreden waardoor de grotere hiaten niet exponentieel zijn verdeeld (zie Bijlage F.1.2; ook van invloed op factor ψ in vergelijking (4.35) op blz. 90).
4) In de afleiding van de elementaire formules van de hiaatacceptatie-modellen − zie formules (4.19) t/m (4.31) − wordt de aanname gedaan, dat de verdeling van het rotondeverkeer niet wordt beïnvloed door het invoegend verkeer. Als bestuurders echter bij het oprijden zeer kleine hiaten benutten, zodanig dat het kritisch hiaat kleiner is dan de som van de minimum volgtijd op de rotonde en de volgtijd die bestuurders bij het oprijden aanhouden ($t_C < t_M + t_F$), geldt deze assumptie niet meer. Troutbeck en Kako (1999) hebben een formule ontwikkeld om de fout die hierdoor ontstaat te corrigeren (invoegverstoringsfactor *z*, zie blz. 89 en vergelijking (4.35) op blz. 90).
5) Aan de formules van Tanner (1967), Troutbeck (1986), Fisk (1989) en Hagring (1998) voor de toeritcapaciteit naar rotondes met meer dan één strook, ligt de assumptie ten grondslag dat de hiaten op elk van de rotondestroken onafhankelijk ten opzichte van elkaar verdeeld zijn. Met behulp van vergelijking (4.37) op blz. 90 wordt onderzocht in hoeverre deze assumptie op turborotondes moet worden bijgesteld. Dit is van belang voor het onderzoek naar veronderstelling 2 genoemd in paragraaf 4.1.5. (Zie paragraaf 4.5.4, blz. 105).

4.2.6 Hiaatacceptatie-modellen

In de vorige paragrafen zijn de capaciteitsmodellen gebaseerd op de theorie van de hiaatacceptatie, in algemene zin getypeerd. In deze paragraaf worden enkele modellen – die voor andere weer als basis hebben gediend – kort besproken.

Model van Tanner

Het eerste hiaatacceptatie-model is ontwikkeld door Tanner (1962). Hij verdeelde de verkeersstroom op de voorrangsweg in ‘blocks’ (waarin verkeer vanaf de zijweg niet kan invoegen) en een deel met ‘gaps’ (waarin verkeer vanaf de zijweg wel kan invoegen). Het model van Tanner kan worden geschreven als:

$$C_E = Q_R \frac{(1 - t_M \cdot q_R) \cdot e^{-q_R (t_C - t_M)}}{1 - e^{-q_R \cdot t_F}} \quad (4.19)$$

Als er geen rotondeverkeer aanwezig is (O_R=0), geldt de limietwaarde [141]:

$$C_E = \frac{3600}{t_F} \quad (4.20)$$

Hierin is (in de notatie van deze studie):

C_E : capaciteit van de toerit [pae/h]
Q_R, q_R : intensiteit rotondeverkeer [pae/h c.q. pae/s]
: intensiteit rotondeverkeer in voertuigen per seconde [pae/s]
t_M : minimum volgtijd rotondeverkeer [s/pae]
t_C : kritisch hiaat [s/pae]
t_F : oprijvolgtijd toeritverkeer [s/pae]

Model van Siegloch

Siegloch (1973) gebruikt in zijn model een continue hiaatacceptatie-formule. In de hiaatverdelingsfunctie wordt de minimum volgtijd t_M verwaarloosd (M1-verdeling). Het kan worden geschreven als: $C_E = \frac{3600}{t_F} \cdot e^{-q_R \cdot (t_C - \frac{1}{2} t_F)}$ (4.21)

Het model van Siegloch vormt het uitgangspunt voor een model van Brilon en Bäumer (2004) voor de capaciteit van toeritten naar tweestrooksrotondes, dat in het *Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren,* Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, (FGSV, 2006) is opgenomen. De vergelijking luidt voor de capaciteit van de gehele toerit:

$$C_E = 3600 \cdot \frac{n_E}{t_F} \cdot e^{-\frac{Q_R}{3600}(t_C - \frac{t_F}{2})} \quad (4.22)$$

Hierin is:

C_E : capaciteit van de totale toerit (beide stroken samen) [pae/h]
n_E : parameter voor het aantal rijstroken op de toerit
= 1 voor een enkelstrooks toerit (maar niet aanbevolen door FGSV)
= 1,14 voor een tweestrooks toerit (in a.w. Brilon en Bäumer: n_E = 0,3a_{LA} +1,06, waarin a_{LA}: aandeel linksafslaand verkeer op de beschouwde toerit[142])
Q_R : intensiteit rotondeverkeer (van alle stroken samen) [pae/h]

In het *Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren* is voor t_C = 4,3 s/pae en t_F = 2,5 s/pae ingevuld.

Model van Troutbeck

Troutbeck (1984) publiceerde een model gebaseerd op een verdeling van het verkeer op de voorrangsweg, zoals voorgesteld door Cowan (1975) in zijn M3-model om rekening te kunnen houden met variaties in de clustering van het verkeer op de voorrangsweg. Dit model kan worden geschreven als:

---

[141] Vergelijking (4.20) geldt voor alle hiaatacceptatie-modellen die van een discrete hiaatbenuttingsfunctie uitgaan. In het vervolg zal deze daarom niet steeds worden herhaald.

[142] Hieruit afgeleid komt de waarde n_E=1,14 overeen met 14% op de linker toeritstrook bij gemiddeld 24% linksafslaand verkeer

$$C_E = 3600 \cdot \lambda_R \cdot (1 - t_M \cdot q_R) \frac{e^{-\lambda(t_C - t_M)}}{1 - e^{-\lambda \cdot t_F}} \quad (4.23)$$

Hierin geldt: $\lambda_R = \frac{\varphi_R \cdot q_R}{1 - t_M \cdot q_R}$ (4.24)

C_E : capaciteit van de toerit [vtg/h of pae/h]
q_R : intensiteit rotondeverkeer [vtg/s of pae/s]
φ_R : proportie vrije voertuigen op de rotonde
λ_R : clustering-gecorrigeerde rotonde-intensiteit [vtg/s of pae/s]

In paragraaf 4.2.2 is opgemerkt, dat de uitdrukking voor λ_R vervangen kan worden door $\lambda_R = \rho_R \cdot q_R$ zie (4.16).

Als geldt $\rho_R = 1$, dan is het model van Troutbeck identiek aan het model van Tanner.

Model van Akçelik

Akçelik (1999, 2007) heeft het model van Troutbeck gemodificeerd. In zijn afleiding maakt hij analoog aan Tanner gebruik van de begrippen 'blocked time' en 'unblocked time'. In tegenstelling tot Tanner en Troutbeck wordt het proces van hiaatbenutting via een continue functie benaderd. Zijn formule voor de capaciteit luidt:

$$C_{Ei} = \frac{3600}{t_F} \cdot (1 - t_M . q_R + 0,5 \cdot \varphi_R \cdot q_R \cdot t_F) \cdot e^{-\lambda_R (t_C - t_M)} \quad (4.24).$$

Hierin geldt: $\lambda_R = \frac{\varphi_R \cdot q_R}{1 - t_M \cdot q_R}$ (4.25).

Deze formule beschrijft voor meerstrooksrotondes de basiscapaciteit per toeritstrook. De formules die deze capaciteit beperken (door onder andere onvolledige benutting als gevolg van verschillende herkomst- en bestemmingspatronen) blijven hier buiten beschouwing.

Voor het aandeel vrij rijdende auto's φ_R heeft Akçelik in SIDRA verschillende functies gebruikt. Aanvankelijk (1999) werd gebruik gemaakt van $\varphi_R = e^{-b \cdot t_M \cdot q_R}$ (4.26).

Later is dit vervangen door: $\varphi_R = (1 - t_M \cdot q_R) / [1 - (1 - k_d) \cdot t_M \cdot q_R]$ (4.27).

Tabel 4.2.1 geeft een overzicht van de gebruikte waarden. Zie voor een nadere toelichting Bijlage F.1.3

Tabel 4.2.1 Parameters in SIDRA voor φ

Aantal rotondestroken	1999		2006	
	t_M	$b \cdot t_M$	t_M	k_d
1	2	5	2	2,2
2	1,2	3	1	2,2
> 2 .	1	2,5	0,8	2,2

Voor het kritisch hiaat en de oprijvolgtijd worden geen vaste waarden gegeven. De laatste is bijvoorbeeld afhankelijk van de oprijsnelheid en de afstand tussen wachtende voertuigen. Voor een enkelstrooksrotonde wordt als voorbeeld gegeven:
t_C = 4,15 s/vtg
t_F = 2,34 s/vtg
Een algemene omgevingsfactor maakt het mogelijk de waarden voor t_C en t_F op te hogen (voor de USA een factor 1,22).

Opvallend is, dat in dit model de invloed van de verdeling van het verkeer over verschillende rotondestroken niet wordt benaderd via een daarop aangepaste modelstructuur, maar:

- via andere waarden voor de minimum volgtijd t_M en
- aanpassingsfactoren voor de richtingverdeling en wachtrijen.

Model van Fisk

Tanner heeft in 1967 een meerstrooksvariant gepubliceerd van zijn model. Fisk (1989) heeft deze formule van Tanner gemodificeerd voor toepassing op voorrangskruispunten waar de verkeersdeelnemers met een verschillend kritisch hiaat reageren op elk van de rijstroken op de voorrangsweg. Het resultaat is:

$$C_{Ei} = Q_R \frac{(1-q_{R1}\cdot t_M)(1-q_{R2}\cdot t_M).....(1-q_{Rn}\cdot t_M)}{(1-e^{-q_R\cdot t_{Fi}})} e^{(q_R\cdot t_M - \sum_l q_{R,l}\cdot t_{Ci,l})} \qquad (4.28)$$

Hierin is:
$q_{R,l}$: de intensiteit van het rotondeverkeer op strook l [vtg/s of pae/s]
$t_{C,l}$: het kritisch hiaat in rotondestroom l voor het toeritverkeer [s/vtg of s/pae]
i : index voor de toeritstrook
l : index voor de ligging van rotondestrook (in het eerste deel genummerd).

Model van Hagring

Een hiaatacceptatie-model in zijn meest algemene vorm is door Hagring (1996, 1998) afgeleid. Het is een formule voor de capaciteit van één rijstrook van de toerit naar een meerstrooksrotonde. Deze formule is een generalisatie van de oorspronkelijke capaciteitsformule van Troutbeck (1984). De formule van Hagring, geschreven in een vorm vergelijkbaar met de voorgaande formules luidt[143]:

$$C_{Ei} = \Lambda_R \prod_j (1-t_M\cdot q_{Rj}) \frac{e^{-\sum_k \lambda_{Rk}(t_{Ck,i}-t_M)}}{1-e^{-t_{Fi}\sum_l \lambda_{Rl}}} \qquad (4.29)$$

Hierin geldt: $\lambda_{Rj} = \frac{\varphi_j \cdot q_{Rj}}{1-t_M\cdot q_{Rj}}$ (4.30)

Hierin is:
C_{Ei} : de capaciteit van toeritstrook i [vtg/h of pae/h]
$\Lambda_R = 3600\cdot\Sigma\lambda_{Rj}$: clustering-gecorrigeerde rotonde-intensiteit [vtg/h of pae/h]
$\lambda_{R,j}$: clustering-gecorrigeerde intensiteit van rotondestrook j [vtg/s of pae/s]
φ_j : proportie vrije voertuigen op rotondestrook j
j, k *en* l : indices voor de ligging van (dezelfde) rotondestroken
i : index voor de ligging van de toeritstrook.
Formule (4.30) kan door invulling van vergelijking (4.15)worden vereenvoudigd tot:
$\lambda_{Rj} = \rho_j \cdot q_{Rj}$ (4.16).

Alle andere modellen die een discrete hiaatbenuttingsfunctie hanteren kunnen van dit model worden afgeleid. Wanneer bijvoorbeeld geen rotondestroken worden onderscheiden en voor t_M= 0 wordt ingevuld, ontstaat het model van Harders (1968).

[143] De originele formule van Hagring laat een onderscheid toe om een verschillende waarde voor de oprijvolgtijd t_F te hanteren, afhankelijk welke rotondestrook wordt opgereden (t_{Fl}). In de schatting van parameters (1998) heeft ook Hagring van deze theoretische mogelijkheid geen gebruik gemaakt. In de aangepaste notatie is t_{Fi} alleen afhankelijk van de ligging van de toeritstrook en daarom vóór het sigmateken geplaatst.

Als ρ = 1 is het model van Hagring identiek aan een model dat van de 'Tannerverdeling' uitgaat, i.c. het model van Fisk.

Model van Wu

Wu (1997) heeft de meerstrooksversie van de formule van Tanner bewerkt, uitgaande van een continue hiaatbenuttingsfunctie. De capaciteitsformule krijgt dan de gedaante:

$$C_E = 3600 \cdot \frac{n_E}{t_F} \cdot \left(1 - \frac{t_M . Q_R}{3600 \cdot n_R}\right)^{n_R} \cdot e^{-\frac{Q_R}{3600}\left(t_C - \frac{t_F}{2} - t_M\right)} \qquad (4.31)$$

Hierin is (naast de al meermalen genoemde symbolen):
n_E : het aantal toeritstroken
n_R: het aantal rotondestroken.

Duidelijk is, dat deze formule de capaciteit van de totale toerit beschrijft, in tegenstelling tot de modellen van Fisk en Hagring. In deze formule wordt geen onderscheid gemaakt tussen het kritisch hiaat t_C in de buitenste en binnenste rotondestrook of tussen de linker of rechter toeritstrook. Het laatste geldt ook voor de oprijvolgtijd t_F. Het voordeel daarvan is, dat dit een beperking van het aantal paramaters oplevert, zodat deze parameters beter op stroomniveau gekalibreerd kunnen worden. Ook gaat in tegenstelling tot de formules van Fisk en Hagring deze formule er impliciet van uit, dat het rotondeverkeer gelijkelijk over de stroken is verdeeld. In de praktijk is dat zelden het geval. Op grond van een viertal onderzoeken op grote tweestrooksrotondes zijn door Brilon, Bondzio en Wu (1997) de volgende parameterwaarden gevonden: t_C = 4,12 s/pae, t_F = 2,88 s/pae en t_M = 2,10 s/pae. In het *Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren* (FGSV, 2006) wordt deze formule alleen aanbevolen voor enkelstrooksrotondes. In dat geval is deze formule qua functionaliteit vergelijkbaar met de enkelstrooksversie van de oorspronkelijke formule van Tanner (1962). De aanbevolen parameterwaarden zijn dan: t_C = 4,1 s/pae, t_F = 2,9 s/pae en
t_M = 2,1 s/pae.

4.2.7 Gevoeligheidsanalyses hiaatacceptatie-modellen

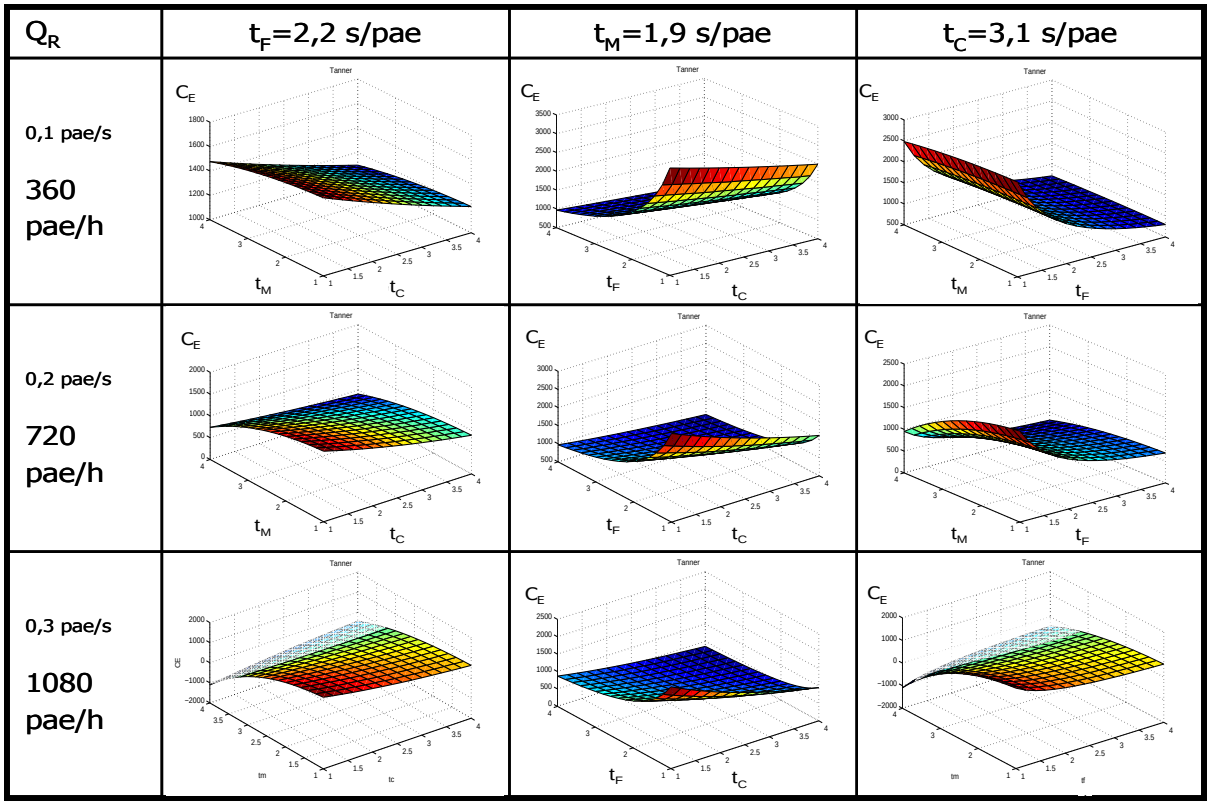
In Bijlage F.1.2 worden verschillen tussen hiaatacceptatie-modellen in beeld gebracht.
Vooral de veronderstellingen ten aanzien van de hiaatverdeling op de rotonde zijn duidelijk van invloed (zie Figuur F.1-3 en F.1-4). En uiteraard zijn de waarden van de basale parameters t_C, t_F en t_M van groot belang.

Invloed parameters t_C, t_F en t_M

Door de hoeveelheid parameters in combinatie met exponentiële functies zijn de hiaatacceptatie-modellen veelal minder doorzichtig dan de conflict-stroommodellen. Daarom is in Figuur 4.2-3 het resultaat van een gevoeligheidsanalyse van het model van Tanner – als de klassieker onder de hiaatacceptatie-modellen– in beeld gebracht.

Bij lage rotonde-intensiteiten is de waarde van de oprijvolgtijd de belangrijkste parameter. De invloed van het kritisch hiaat is bij alle rotonde-intensiteiten manifest, maar neemt relatief toe bij hogere rotonde-intensiteiten. In absolute zin heeft de waarde van het kritisch hiaat de grootste invloed wanneer de rotonde tot ca. de helft van de capaciteit is belast. Voor de minimum volgtijd geldt, dat bij toenemende rotonde-intensiteiten de invloed groter wordt.

Bijvoorbeeld is het effect van een (extreme) keuze van t_M >1/0,3 = 3,3 s/pae bij een rotonde-intensiteit van 360 pae/h nauwelijks waarneembaar, terwijl bij een rotonde-intensiteit van 1080 pae/h het model –uiteraard– negatieve capaciteitswaarden oplevert.



Figuur 4.2-3 Gevoeligheidsanalyse capaciteitsmodel van Tanner

Rol product maximum aandelen vrij verkeer bij meer dan één rotondestrook

In paragraaf 4.2.2, blz.78 is de uitdrukking φ= (1-q_R.t_M) geïnterpreteerd als de maximale waarde voor het aandeel ongeclusterd verkeer, uitgaande van een random verkeersgeneratie die alleen wordt verstoord door een minimum volgtijd t_M. In de formules voor capaciteitsmodellen waarin met meer dan één rotondestrook rekening wordt gehouden ─ vergelijking (4.28) t/m (4.31) ─, is het de moeite waard aandacht te schenken aan de rol van het product van de aandelen vrij verkeer per strook, hier aangeduid als de productfactor

$$\prod_j (1 - t_M \cdot q_{R\,j}) \qquad (4.32)$$

Als al het verkeer zich op één rotondestrook zou bevinden, is de waarde van (4.32) gelijk aan $(1 - t_M \cdot \sum_j q_{R\,j})$, zoals in de formules (4.19) en (4.23).

Vergelijking van beide uitdrukkingen geeft een goed beeld van het effect van de verdeling van het verkeer over verschillende rotondestroken op de capaciteit van de linker toeritstrook. In het geval dat de kritische hiaten verder alle gelijk zouden zijn, geeft Tabel 4.2.2 het resultaat van deze vergelijking voor:

a) verschillende verdelingen van het verkeer over de rotondestroken, van 100% tot 50% op de buitenste rotondestrook (horizontaal);
b) verschillende rotonde-intensiteiten (vertikaal), van 750 tot 1750 pae/h op de rotondebaan, bij een minimum volgtijd van 1,7 s/pae (capaciteit 2118 pae/h).

Duidelijk is, dat het effect van een betere verdeling van verkeer over de twee rotondestroken (relatief) toeneemt naarmate er meer verkeer op de rotonde rijdt. Een lagere waarde van t_M verkleint het positieve effect van uitdrukking (4.32).

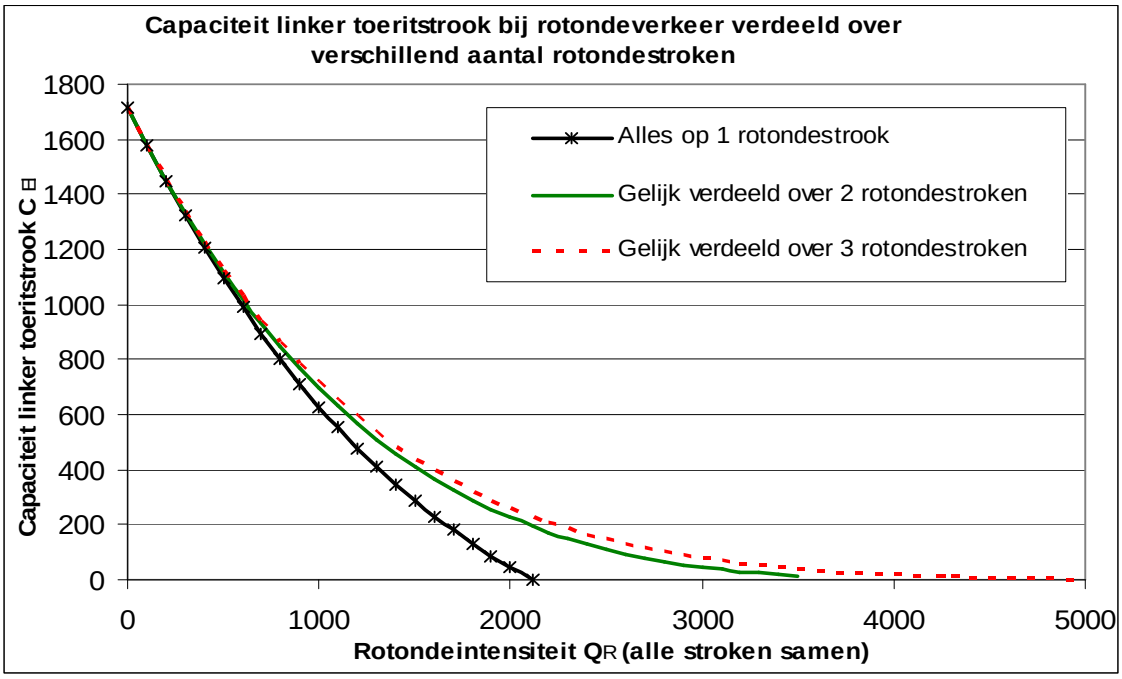
Tabel 4.2.2 Initieel effect van de verdeling van het verkeer over twee rotondestroken

Q_R in pae/h	q_R in pae/s	percentage verkeer op buitenste strook						t_M = 1,7 s/pae
		100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	
		$1-q_{RU}.t_M)(1-q_{RI}.t_M)/\{(1-(q_{RU}+q_{RI})t_M\}$						
750	0,21	1,00	1,02	1,03	1,04	1,05	1,05	C_R (theoretisch) = 2118
1000	0,28	1,00	1,04	1,07	1,09	1,10	1,11	
1500	0,42	1,00	1,15	1,28	1,36	1,41	1,43	
1750	0,49	1,00	1,35	1,63	1,83	1,94	1,98	

Dit gegeven is de basis van het introduceren van uitdrukking (4.37) in paragraaf 4.2.8 (blz. 90). Immers, aan uitdrukking (4.32) ligt assumptie 5 (blz. 81) ten grondslag, namelijk dat de hiaatverdeling in de beide rotondestromen onafhankelijk van elkaar is. Het is de vraag in hoeverre dit uitgangspunt ook geldt op relatief kleine turborotondes, omdat bij het oprijden vanaf de hoofdtak voertuigen op beide stroken voorrang moeten verlenen aan hetzelfde voertuig op de rotonde. Bij het onderzoek van de tweede veronderstelling genoemd in paragraaf 4.1.5 is dit een punt van aandacht.

Initieel effect van twee of drie rotondestroken

Figuur 4.2-4 brengt het effect van de verdeling van het rotondeverkeer over twee of drie stroken in beeld. Daarbij is ervan uitgegaan dat de hiaatverdelingen op de onderscheiden stroken onafhankelijk van elkaar zijn, terwijl voor de eenvoud de waarden voor het kritisch hiaat, de oprijvolgtijd en de minimum volgtijd constant zijn gehouden.



Figuur 4.2-4 Initieel effect van twee of drie rotondestroken

Uit de grafiek blijkt, dat de capaciteit van de linker toeritstrook substantieel toeneemt als het rotondeverkeer gelijk verdeeld wordt over twee rotondestroken. De capaciteit van de linker toeritstrook neemt echter nauwelijks verder toe als een derde rotondestrook zou worden toegevoegd.

4.2.8 Aanpassingen capaciteitsformules

Modificaties in verband met schijnconflict

In de literatuurverkenning is geen hiaatacceptatie-model gevonden waarin bij het kalibreren van de parameters al rekening wordt gehouden met het schijnconflict. Het is de vraag in hoeverre dit mogelijk zou zijn in een schattingsprocedure van het kritisch hiaat. Bezien vanuit de verkeersdeelnemer op de toerit valt het einde van het hiaat vóór een afslaande auto niet samen met het begin van het hiaat achter die auto. In het ene geval gaat het om het moment waarop de afslaande auto de toerit zou hebben gepasseerd en in het andere om het moment waarop de auto daadwerkelijk afslaat. Wel is het mogelijk om hiaten te beschouwen waarin zich wel en waarin zich geen afslaande auto bevond. Maar daarmee ligt de relatie met de invloed van het schijnconflict op de capaciteit niet vast.
Deze theoretische verkenning leidt er toe de invloed van het schijnconflict op stroomniveau te benaderen. Dit kan door een fractie van het afslaande stroom Q_{S1} – al dan niet opgesplitst – te tellen bij het verkeer op de (buitenste) rotondestrook. Steeds wordt gestart met het hanteren van een algemene invloedsfactor voor het afslaande verkeer in de vorm van:

$$q_{R(U)Si} = q_{R(U)} + d_i \cdot q_{S1} \qquad (4.33)$$

Hierin is:

$q_{R(U)S,i}$: virtuele intensiteit op de (buitenste) rotondestrook inclusief het schijnconflict dat het afslaande verkeer oplevert voor toeritstrook *i* [pae/s]
$q_{R(U)}$: intensiteit op de (buitenste) rotondestrook per seconde uitgedrukt in [pae/s]
q_{S1} : intensiteit van afslaand verkeer [pae/s]
d_i : invloedsfactor van het afslaande verkeer op toeritstrook *i*.

Er zijn echter aanwijzingen dat de invloed van het afslaande verkeer samenhangt met de herkomst ervan. Daarom is vergelijking (4.33) uitgebreid tot:

$$q_{RUSi} = q_{RU} + d_{Ki} \cdot q_{S1K} + d_{Hi} \cdot q_{S1H} + d_{HRi} \cdot \frac{q_{RUK} \cdot q_{S1H}}{q_{RUK} + q_{S1H}} \qquad (4.34)$$

Hierin is:

$q_{RUS,i}$: virtuele intensiteit op de buitenste rotondestrook inclusief het schijnconflict dat het afslaande verkeer oplevert voor toeritstrook *i* [pae/s]
q_{RU} : intensiteit op de buitenste rotondestrook per seconde uitgedrukt in [pae/s]
q_{S1K} : intensiteit van afslaand verkeer afkomstig van de tak die een kwart segment voor de toerit ligt [pae/s]
q_{S1H} : intensiteit van afslaand verkeer afkomstig van het rotondesegment gelegen voor de voorliggende aansluittak (een half cirkelsegment voor de toerit) [pae/s]
q_{RUK} : intensiteit van rotondeverkeer op de buitenste rotondestrook afkomstig van de tak die een kwart segment voor de toerit ligt [pae/h]
d_{Ki} : invloedsfactor van het afslaande verkeer afkomstig van de tak die een kwart cirkel segment voor de toerit ligt, voor toeritstrook *i*
d_{Hi} : invloedsfactor van het afslaande verkeer q_{S1H}, voor toeritstrook *i*

d_{HRi} : invloedsfactor van het afslaande verkeer q_{S1H} afhankelijk van de relatieve omvang van het conflicterende rotonde verkeer q_{RUK}, voor toeritstrook i.

Omdat in de onderzoeken de herkomst niet systematisch is onderscheiden, kan de invloed van het afslaande verkeer q_{S1}, opgesplitst in q_{S1H} en q_{S1K}, in deze studie slechts gedeeltelijk worden getoetst. Verder moet worden onderkend, dat stroom q_{RUK} onderdeel is van $q_{RU,}$ die een hoofdverklarende variabel is voor de rotondecapaciteit. Daardoor is in het schattingsproces kans op een wisselwerking tussen parameter d_{HR} en de hoofdparameters in het capaciteitsmodel zeer groot. Daarom moet het schattingsproces met formule (4.34) in fasen (sequentieel) worden uitgevoerd. Steeds wordt gestart met formule (4.33). Duidelijk mag zijn dat de parameters d_H en d_{HR} onderling gerelateerd zijn, waarbij het alleen zinvol is om d_{HR} te introduceren als d_H zonder d_{HR} een negatief teken oplevert.

Invoegverstoring in hiaatacceptatie-modellen

Zoals in paragraaf 4.2.5 is opgemerkt, geldt basisveronderstelling 4 niet als bestuurders vanaf de toevoertak hiaten accepteren, die zo klein zijn, dat de volgende auto op de rotonde als gevolg daarvan moet afremmen. In verband met deze verstoring zijn de capaciteitsformules aangevuld met een correctiefactor (invoegverstoringsfactor z).
Uit een gevoeligheidsanalyse van de formule die hiervoor is ontwikkeld (Troutbeck en Kako, 1999) blijkt dat het reducerend effect op de capaciteit van het invoegen toeneemt bij toename van de rotonde-intensiteit. Bij waarden van bijvoorbeeld t_C = 3,1 s/pae; $t_{F=}$ 2,2 s/pae en t_M = 1,7 s/pae, varieert z van 0,996 (bij Q_R = 100 pae) tot 0,975 (bij Q_R= 1000 pae).
Verkeer vanaf de linker toeritstrook veroorzaakt zelf geen invoegverstoring op de buitenste rotondestrook, maar ondervindt wel invloed van een verstoring van invoegend verkeer vanaf de rechter toeritstrook. Hiervoor is de correctieformule van Troutbeck aangepast. Dit is toegelicht in Bijlage F.1.4.

Afwijkingen tussen hiaatwaarnemingen en stroomwaarnemingen

Tijdens het proces van modelschatten is gebleken, dat naarmate het oprijden van een rotonde complexer wordt (doordat bijvoorbeeld meer irrelevante verkeersstromen onderscheiden moeten worden van de relevante), de parameters uit schattingen op basis van stroommetingen sterker afwijken van de waarden die geschat worden op basis van hiaatmetingen (zie verderop). M.a.w. het verkeersgedrag wijkt sterker af van de assumpties in paragraaf 4.2.5. Daarom zijn aan het gekozen hiaatacceptatie-model extra parameters δ of ξ en ψ toegevoegd om de overbrugging van dat verschil inzichtelijk te maken. Zie vergelijking (4.35).
Als eerste stap is parameter δ als een algemene correctiefactor toegevoegd. Bij analyse van het effect daarvan bleek die vooral samen te hangen met het verschil in waarde van de oprijvolgtijd t_F op grond van hiaatmetingen enerzijds en capaciteitsmetingen anderzijds. In een later stadium is onderzocht in hoeverre het de voorkeur verdient om δ te vervangen door ξ als directe vermenigvuldigingsfactor voor t_F (zie paragraaf 4.5.2).
De ψ is een vermenigvuldigingsfactor voor het kritisch hiaat t_C, die het verschil in waarden van t_C uit de hiaatmetingen en capaciteitsmetingen overbrugt. De toegevoegde waarde van deze factor blijkt vooral voor de linker toeritstrook zijtak van de turborotonde (zie paragraaf 4.5.3).

Gemodificeerd hiaatacceptatie-model

De hiervoor genoemde aanpassingen zijn opgenomen in de volgende vergelijking, waarin het model van Hagring −als de meest algemene formulering van een capaciteitsmodel gebaseerd op hiaatacceptatie− de basis vormt:

$$C_{Ei} = \delta \cdot z_i \cdot \Lambda_{RS} \cdot SG_i \cdot \frac{e^{-\lambda_{RUS,i}(\psi \cdot t_{CRU,i} - t_M) - \lambda_{RI}(\psi \cdot t_{CRI,i} - t_M)}}{1 - e^{-(\lambda_{RUS,i} + \lambda_{RI}) \cdot \xi \cdot t_{Fi}}} \quad (4.35)$$

$$SG_i = (1 - t_M \cdot q_{RUS,i}) \cdot (1 - t_M \cdot q_{RI}) \quad (4.36)$$

Hierin is:

Λ_{RS} =3600 (λ_{RUS}+ λ_{RI}) [pae/h]

$\lambda_j = \rho_j \cdot q_j$ [pae/h]

$\lambda_{j,i}$: clustering-gecorrigeerde rotonde-intensiteit op strook *j* (inclusief schijnconflict voor zover van toepassing vanaf toeritstrook *i*) [pae/s]

δ : algemene correctiefactor voor het verschil tussen de parameters, verkregen uit hiaatmetingen en verzadigde stroommetingen

ξ: : vermenigvuldigingsfactor voor de oprijvolgtijd verkregen uit hiaatwaarnemingen voor toepassing in een capaciteitsmodel (opmerking: ξ wordt alleen gebruikt als de waarde δ = 1 is vastgezet en omgekeerd)

ψ : vermenigvuldigingsfactor voor de kritische hiaten verkregen uit hiaatwaarnemingen voor toepassing in een capaciteitsmodel

ρ_j : clusteringconstante van de hiaatverdeling ten opzichte van de 'Tannerverdeling'

$C_{E\,i}$: capaciteit van de toeritstrook *i* in personenauto-equivalenten per uur [pae/h]

q_{RI} : rotonde-intensiteit op de binnenste rotondestrook [pae/s]

$q_{RUS,i}$: virtuele rotonde-intensiteit inclusief schijnconflict op de buitenste rotonde-strook, in personenauto-equivalenten per seconde (zie vergelijking (4.34) [s/pae]

SG_i :strookgebruikfactor [#]

$t_{C\,i,j}$: het kritisch hiaat in rotondestrook *j* (*RU* of *RI*) voor toeritstrook *i* [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 [s/pae]

z_i : correctiefactor voor de invoegverstoring; z_1 voor de linker toeritstrook en z_2 voor de rechter (of enige) toeritstrook.

Deze formule is ook toepasbaar voor een toeritstrook naar een enkelstrooks segment; dan is q_{RI} = 0. In de kalibratie op stroomniveau wordt steeds gestart met de waarde 1 voor de parameters δ, ξ en ψ.

Onderzoek naar een correctie op assumptie 5 (blz.81): hiaten zijn op twee rotondestroken onafhankelijk van elkaar

Om te onderzoeken in hoeverre een correctie nodig is i.v.m. het uitgangspunt dat de hiaten op beide rotondestroken onafhankelijk van elkaar verdeeld zijn (assumptie 5), wordt in vergelijking (4.35) voor de linker toeritstrook naar een tweestrooks rotondesegment de uitdrukking $SG = (1 - t_M \cdot q_{RUS,1}) \cdot (1 - t_M \cdot q_{RI})$ vervangen door:

$$SG_i = (1-\eta \cdot q_{RUS,i}) \cdot (1-\eta \cdot q_{RI}) \frac{1-\frac{q_{R\max}}{q_{RUS,i}+q_{RI}} \cdot t_M \cdot (q_{RUS,i}+q_{RI})}{1-\frac{q_{R\max}}{q_{RUS,i}+q_{RI}} \cdot \eta \cdot (q_{RUS,i}+q_{RI})} = (1-\eta \cdot q_{RUS,i}) \cdot (1-\eta \cdot q_{RI}) \cdot \frac{1-q_{R\max} \cdot t_M}{1-q_{R\max} \cdot \eta} \qquad (4.37)$$

mits $q_{R\max} \cdot t_M \leq 1$ en $q_{R\max} \cdot \eta < 1$

Hierin is:

SG_i : strookgebruikfactor op de rotonde tegenover toeritstrook i

η : vervanger van de minimum volgtijd in de strookgebruikfactor [s/pae]

q_{Rmax} : de grootste van q_{RUS} of q_{RI}. [pae/s]

De keuze voor gebruik van uitdrukking (4.37) is gebaseerd op een analyse van de rol van de productfactor $\Pi_j(1-t_M \cdot q_{Rj})$ in paragraaf 4.2.7 (zie blz.86). Duidelijk is, dat voor SG moet gelden:

- $SG = 1-t_M \cdot (q_{RUS,1}+q_{RI})$ indien al het verkeer zich op één rotondestrook zou bevinden (ongeacht de waarde van η);
- $SG = (1-t_M \cdot q_{RUS,i}) \cdot (1-t_M \cdot q_{RI})$ indien de hiaten op beide stroken onafhankelijk van elkaar zijn verdeeld (dan geldt $\eta = t_M$);
- SG =0 op het moment dat $q_{R\max} \cdot t_M = 1$, zodat de capaciteitsfunctie de waarde 0 bereikt, afhankelijk van de verdeling van het verkeer over de rotondestroken, gegeven de waarde van de minimum volgtijd t_M, maar onafhankelijk van de waarde van η.

De verhouding $\nu = \eta/t_M$ kan worden beschouwd als een strooksynchronisatieconstante.
Is deze groter dan 1, dan is het effect van de verdeling van het verkeer over twee stroken minder positief dan assumptie 5 veronderstelt: de hiaten in beide stromen zijn niet onafhankelijk van elkaar en worden zo gesynchroniseerd dat er minder bruikbare hiaten ontstaan (hiaten treden verschoven ten opzichte van elkaar op).
Als geldt $\nu = \eta/t_M \leq 1$, zijn de hiaten in beide stromen ook niet onafhankelijk van elkaar verdeeld, maar dan vallen de hiaten op beide stroken meer samen.
Als de verhouding $\nu = \eta/t_M$ weinig afwijkt van 1 is deze uitbreiding van de capaciteitsformule niet nodig.

Niet moet worden uitgesloten dat een eventueel gemeten effect zowel afhangt van de maatvoering van de rotonde, als van het optredende belastingpatroon. Immers de passage van een auto op de rotonde tegenover de hoofdtak is het startmoment van een hiaat voor zowel de linker als de rechter toeritstrook. Beide startmomenten vallen niet samen. Afhankelijk van de boogstralen van de rotonde verschillen de rijpaden en rijsnelheden van de auto's vanaf de beide stroken van de hoofdtak. Die bepalen de passagemomenten tegenover de zijtak. De verdeling van deze passagemomenten is bepalend voor de vraag in hoeverre een zekere synchronisatie van hiaten een positief of negatief effect heeft. Maar ook is het – toevallige – belastingpatroon van invloed: de omvang van het hiervoor beschreven fenomeen is afhankelijk van de verhouding tussen verkeer afkomstig van de voorliggende tak en het voorliggende rotondesegment.

Onderzoek naar de grootte van de afwijking van assumptie 5 is een belangrijk element in het onderzoek naar veronderstelling 2 op blz.73. Zie ook paragraaf 4.5.4 op blz. 105.

Aanduiding modificaties in modellen

De toevoeging ^{C} aan de modelnamen in de tabellen van paragraaf 4.5 betekent, dat de modellen zijn uitgebreid met de factoren δ *of* ξ, ψ en z.

Modellen die zijn uitgebreid met een factor om rekening te houden met het schijnconflict worden aangeduid met de toevoeging ^{S}, of met ^{KH} in het geval voor het schijnconflict onderscheid wordt gemaakt tussen verkeer vanaf de voorliggende aanvoertak (een kwart cirkelsegment voor de toerit) en verkeer dat afkomstig is van het daarvoor gelegen rotondesegment (een half cirkelsegment voor de toerit).
Als ook nog wordt onderzocht of Q_{S1H} met name door het conflict met $Q_{R(K)}$ een positief effect heeft op de toeritcapaciteit, wordt de toevoeging ^{KHR} gebruikt.

4.2.9 Modelkeuze en modificaties

Keuze hiaatacceptatie-model

Afhankelijk van de functies die voor de hiaatverdelingsfunctie *f(t)* en de hiaatbenuttingsfunctie *g(t)* uit vergelijking (4.6) worden gebruikt, kunnen alle hiaatacceptatie-modellen worden ingedeeld. Zie Tabel 4.2.3 .

Tabel 4.2.3 Indeling hiaatacceptatie-modellen

Hiaat-verdeling / Hiaat-benutting	M1-verdeling; rotondestroken niet onderscheiden.	M3-verdeling			
		Minimale clustering cf. Tannerverdeling		Grotere clustering mogelijk	
		Eén rotonde-baan	Twee of meer rotondestroken	Eén rotonde baan	Twee of meer rotondestroken
discreet	Harders 1968	Tanner 1962	Tanner 1967 (2 stroken Fisk 1989 (2^{+} stroken)	Troutbeck 1984	Troutbeck 1986; Hagring 1996
continu	Siegloch 1973; Brilon & Stuwe 1991; Brilon & Bäumer 2004 door FGSV[144] 2006 aanbevolen voor tweestrooksrotondes		Wu 1997, door FGSV 2006 aanbevolen voor enkelstrooks-rotondes	Akçelik 1999, 2007 Ook toegepast voor meerstrooksroton-des via aangepaste parameterwaarden en toeritstrook gebruiksfuncties	

Duidelijk is, dat het verschil in hiaatbenuttingsfunctie *g(t)* (continu of discreet) qua functionaliteit van de capaciteitsmodellen van geen belang is (Bijlage F.1.3). Bij de functie voor de hiaatverdeling op de rotonde *f(t)* ligt dat anders. Al dan niet rekening houden met de

[144] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

minimum volgtijd t_M heeft grote invloed op het functieverloop (model van Siegloch versus de andere modellen in Figuur F.1-6 en F.1-7). Dat beïnvloedt de waarden van de andere parameters t_C en t_F wanneer die worden geschat op stroomniveau. Maar ook speelt de minimum volgtijd t_M een belangrijke rol in een modelstructuur die rekening houdt met het effect van het strookgebruik op de rotonde. Dat betekent dat voor de enkelstrooksrotonde en de hoofdtak van de turborotonde alleen modellen uit de derde en vijfde kolom van Tabel 4.2.3 in aanmerking komen. Voor de zijtak van de turborotonde betreft dat één van de modellen uit de vierde en zesde kolom. Voor de enkelstrooksrotonde is het model van Troutbeck (1984) de meest algemene vorm voor een hiaatacceptatie-model, omdat die de mogelijkheid open laat rekening te houden met extra clustering. Het model van Tanner is daarin inbegrepen. Voor de capaciteit van een toeritstrook naar een tweestrooks rotondesegment is dat het model van Hagring. Daarin is het model van Fisk inbegrepen. Hoewel ook de mogelijkheden van het lineaire model en het eenvoudige exponentiële model (gebaseerd op de M1-hiaatverdeling) worden onderzocht, zal het vervolg van deze studie zich toespitsen op het gebruik van de gemodificeerde modellen Troutbeck en Hagring. Bijlage F.1.5 bevat een commentaar op de modelkeuze van FGSV (2006).

Modificaties

Om de mogelijke invloed van bovenproportionele clustering van het rotondeverkeer op stroomniveau te onderzoeken, is het van belang dat het mogelijk is om met behulp van vergelijking (4.15) de modellen van Troutbeck en Hagring te vereenvoudigen. Om het verschil tussen de uitkomsten op basis van hiaatmetingen en capaciteitsmetingen te overbruggen worden de correctiefactoren δ of ξ en ψ toegevoegd. Voor het onderzoek naar de invloed van het schijnconflict zijn de modellen verder gemodificeerd. Dit leidt tot vergelijking (4.35) op blz. 90, waaruit alle overige in deze studie gebruikte hiaatacceptatie-modellen kunnen worden herleid. Verder is de strookgebruikfactor SG –via vergelijking (4.37) – in het model van Hagring geëxpliciteerd. Deze is echter niet van invloed op de uitkomst indien $\eta = t_M$.

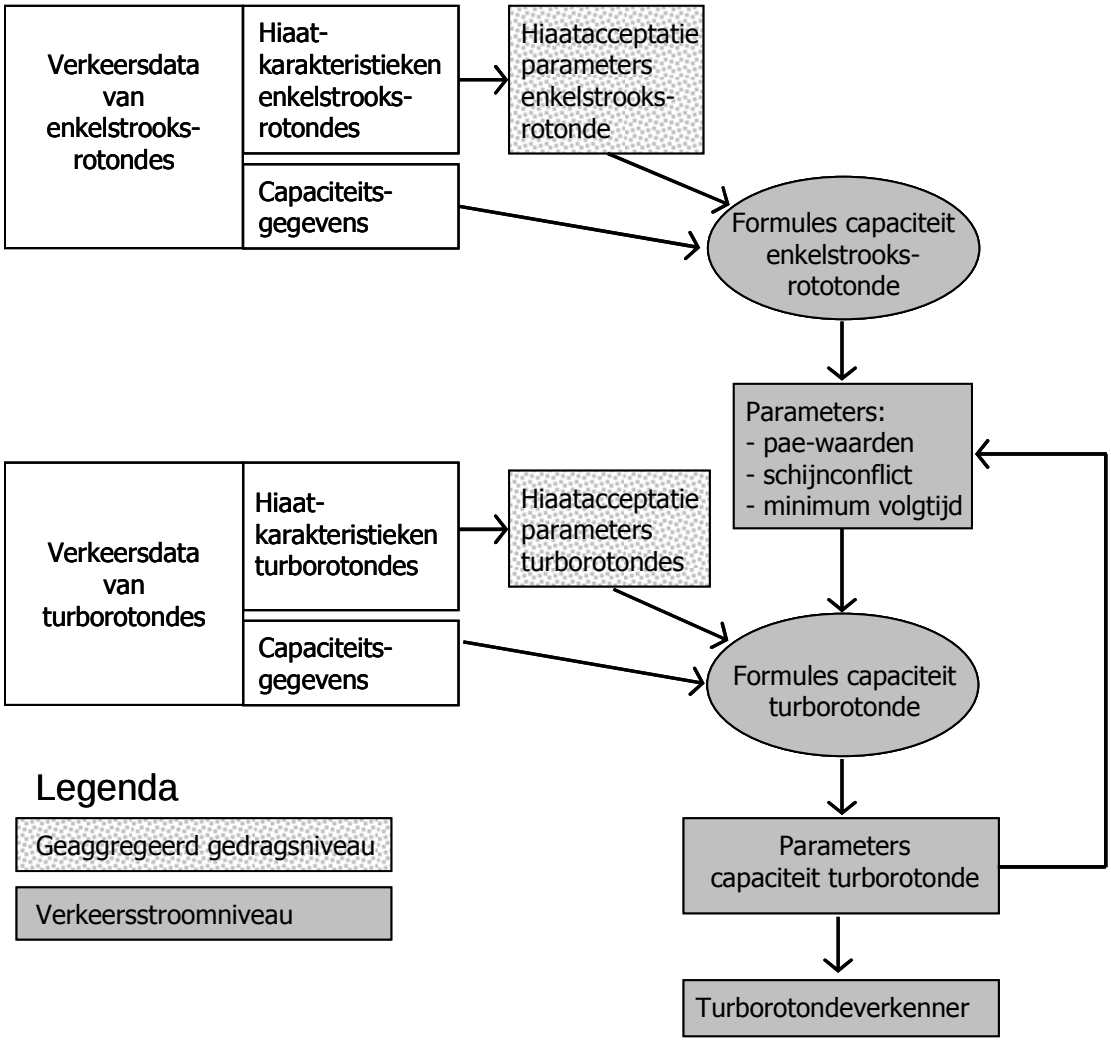
4.3 Onderzoeksopzet

Omdat in Nederland gebleken is, dat het schijnconflict invloed heeft op de toeritcapaciteit, terwijl er geen methode beschikbaar is om deze invloed via hiaatmetingen te kwantificeren, kan niet volstaan worden met een benadering die alleen op hiaatmetingen is gebaseerd. In het onderzoek wordt daarom een tweesporenbenadering toegepast: zowel hiaatmetingen als capaciteitsmetingen.

De modelschatting wordt in stappen uitgevoerd (zie Figuur 4.3-1):

a) het direct bepalen van de verkeersgedragparameters t_C, t_F en t_M uit hiaatmetingen (geaggregeerd gedragsniveau);
b) een simultane parameterschatting op basis van capaciteitsmetingen voor elk van de capaciteitsmodellen (voor zover de modelstructuur dat toelaat) op stroomniveau;
c) een sequentiële parameterschatting op stroomniveau gebruikmakend van de schattingsresultaten ad a).

Tijdens de uitvoering van dit proces is gebleken, dat de onderlinge afstemming van de resultaten uit deze stappen complexer is dan bij aanvang werd verwacht. Afgezien van de problematiek van het schijnconflict blijken afwijkingen tussen een benadering via hiaatmetingen en capaciteitsmetingen voldoende reden om niet met hiaatmetingen te volstaan. Met name betreft dit de meer complexe situaties (zie de paragrafen 4.5.2 en 4.5.3). Afwijkingen tussen de resultaten van ad b) en c) met die van ad a) zijn aanleiding om de uit de literatuur bekende modellen te modificeren. Dat gebeurt met de parameters δ *of* ξ en ψ in vergelijking (4.35) op blz. 90.



Figuur 4.3-1 Stroomdiagram kalibratieproces

4.3.1 Dataverzameling

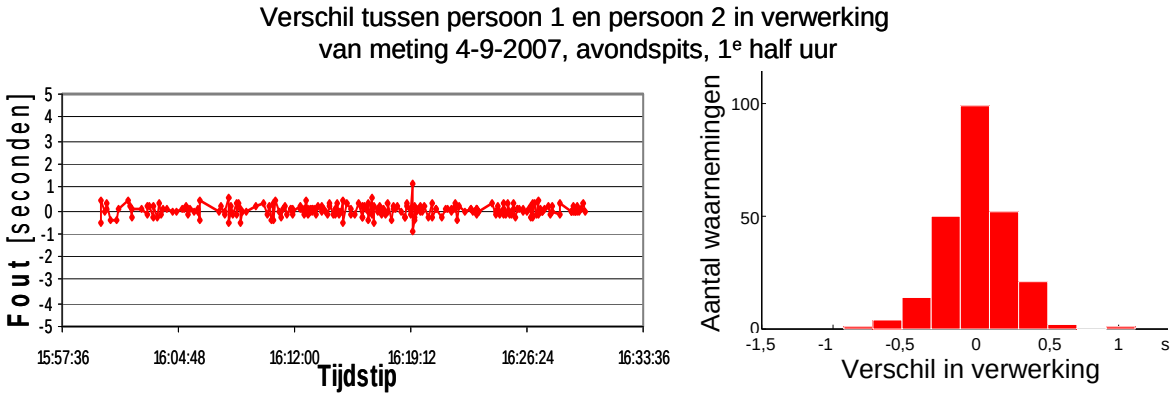
Begonnen is met het meten van enkelstrooksrotondes en wel om twee redenen. De mogelijkheden om op een turborotonde capaciteitsmetingen uit te voeren zijn zeer beperkt. Verder is op een turborotonde het aantal onafhankelijke variabelen zo groot, dat het zeer moeilijk is om voldoende metingen te verkrijgen om daar de invloed van het schijnconflict en voertuigsamenstelling op een turborotonde simultaan met de andere variabelen te kunnen schatten. Allereerst is gebruik gemaakt van capaciteitsmetingen en hiaatmetingen die in 2001 en 2002 in opdracht van de provincie Zuid-Holland zijn uitgevoerd. Hierbij waren drie enkelstrooksrotondes betrokken en één turborotonde in de N471(Van Hogendorpweg)/

Landscheiding te Rotterdam). In 2007 zijn aanvullende capaciteitsmetingen en hiaatmetingen uitgevoerd op de turborotonde N219/A20zuid te Nieuwerkerk aan den IJssel. Verder is gebruik gemaakt van hiaatmetingen op de rotonde N459/A12-noord te Reeuwijk. Bijlage F.2 geeft meer gedetailleerde informatie over de gehouden onderzoeken. De onderzoeken zijn uitgevoerd met behulp van videocamera's op hooggelegen punten, bevestigd aan lichtmasten. Gemeten zijn:

- van het toeritverkeer het moment van oprijden van de rotonde;
- van het rondgaande verkeer het moment van het passeren van een denkbeeldige lijn in het verlengde van de linkerkant van de toerit;
- van het afslaande verkeer het moment van het verlaten van de rotonde.

Onderscheiden zijn drie voertuigsoorten: personenauto's, ongelede vrachtauto's en gelede vrachtauto's, met daarnaast nog een restcategorie. Op momenten dat de wachtrij dreigt te verdwijnen zijn automobilisten van uiteenlopende leeftijd ingezet om een rondje op de rotonde te rijden, zodat het langer mogelijk was capaciteitsmetingen voor het toeritverkeer uit te voeren. Gebruikt zijn alleen de data bij een ongestoorde afvoer vanaf de rotonde. De afvoer op de buitenste rotondestrook in noordelijke richting van de rotonde Nieuwerkerk aan den IJssel was echter door weefbewegingen niet optimaal.

De passeertijdstippen zijn door middel van het indrukken van toetsen manueel vastgelegd en genoteerd in 0,1 seconden. Dit betekent dat er sprake is van enige onnauwkeurigheid in het vastleggen van passeermomenten. Figuur 4.3-2 geeft een beeld van de resultaten van een controleverwerking van passagetijden. Uitgaande van een normale verdeling van de fouten per waarnemer is de standaardafwijking per waarnemer: 0,15 s. Zie Tabel 4.3.1.



Figuur 4.3-2 Voorbeeld van gemeten verschillen in vastleggen passeertijdstip

Tabel 4.3.1 Verschillen tussen de dataverwerking door twee personen

	1e half uur	2e half uur	3e half uur	4e half uur	totale periode	per waarnemer
Variantie	0,03	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04/2=0,02
Standaardafwijking (Std)	0,18	0,23	0,23	0,19	0,21	**0,15**
Aantal waarnemingen	244	355	343	357	1299	

Geconcludeerd kan worden, dat de verschillen voor het schatten op hiaatniveau vrij groot zijn.

4.3.2 Gebruik van de data

Op basis van de passagetijdstippen per voertuigsoort worden zowel de volgtijden alsook de intensiteiten in capaciteitssituaties bepaald. De volgtijden zijn voor verschillende groepen bepaald: alle voertuigen gemiddeld, alleen personenauto's en tussen personenauto's onderling op momenten dat er geen schijnconflict optrad. Met de volgtijden worden de parameters in hiaatacceptatie-modellen geschat. De volumemetingen in capaciteitssituaties zijn gegroepeerd tot 5-minuten perioden. Hiermee worden de parameters in een lineair model geschat en worden de hiaatacceptatie-modellen gevalideerd met een schatting van de correctieparameters δ en ψ.

4.4 Kalibratie hiaatacceptatie-parameters

De sleutelvariabelen in hiaatacceptatie-modellen zijn:
Karakteristieken van de bestuurders op de rotonde
t_M = minimum volgtijd
ρ = clusteringconstante
Karakteristieken van de bestuurders vanaf de toerit
t_C = kritisch hiaat
t_F = oprijvolgtijd

De schatting van deze parameters op basis van hiaatwaarnemingen wordt in deze paragraaf behandeld.

4.4.1 Minimum volgtijd t_M en clusteringconstante ρ

De minimum volgtijd is in het concept van de hiaatverdeling in eerste instantie een eigenschap van het geclusterde verkeer. Maar in de M3-verdeling is t_M een parameter die de mate van verschuiving van de exponentiële functie *f(t)* aangeeft voor het ongeclusterde deel φ van het rotondeverkeer. Dit betekent dat er een samenhang bestaat tussen t_M en φ. Sullivan en Troutbeck (1994) wijzen er op, dat – gegeven een bepaalde intensiteit q – de distributie van de grotere hiaten niet wijzigt zolang de waarde van $\varphi \cdot e^{\lambda \cdot t_M}$ constant is. In de literatuur wordt de schatting van t_M, de functie van $\varphi = \rho - b \cdot q$ (vergelijking (4.14)) en de verdeling van λ dan ook in onderlinge samenhang behandeld. Daarbij worden verschillende wiskundige technieken gebruikt. Cowan (1975 heeft gekozen voor een combinatie van momentenmethode en Komogorov-Smirnov statistiek. Sullivan en Troutbeck vergelijken de variantie van de residuen voor de berekende en waargenomen frequentieverdeling van volgtijden groter dan 4 seconden van drie methoden (momentenmethode, maximum likelihood en kleinste kwadratenmethode). Hagring (1998) heeft deze methoden ook gehanteerd, gebruikmakend van steeds drie waarden voor t_M =1,5 s/vtg, 1,8 s/vtg en 2,0 s/vtg. De resultaten leverden echter geen eenduidig beeld op. Zijn conclusie is, dat alle uitkomsten voldeden. Op arbitraire gronden heeft hij gekozen voor de resultaten van de momentenmethode, met t_M =1,5 s/vtg of 1,8 s/vtg.
Hoogendoorn (2005) heeft een methode ontwikkeld om geclusterd en ongeclusterd verkeer te onderscheiden. Van Beinum (2007) heeft cf. deze methode de volgtijden gesplitst in geclusterd en ongeclusterd verkeer en vervolgens de gemiddelde waarde t_B van de volgtijd

van het geclusterde verkeer bepaald. Voor de enkelstrooksrotonde Schipluiden is zo een waarde t_B = 2,2 s/pae gevonden (a.w., blz. 39). Dit is een waarde die groter is dan die van de oprijvolgtijd t_F = 2,1 s/pae (zie par. 4.4.3). Mogelijk wordt met deze methode de gemiddelde volgtijd gevonden van auto's die vanaf de vorige tak gebruik hebben gemaakt van eenzelfde hiaat. Het volgen van de voorganger vraagt op een rotonde echter een kleinere taakbelasting dan het oprijden. Het is dan ook zeer onwaarschijnlijk, dat deze waarde (t_B) de tijdsafstand t_M weergeeft waarop een volger nog wordt beïnvloed door zijn voorganger. Dit betekent dat t_M niet identiek is met t_B.

Met de thans ter beschikking staande methoden kan de waarde van t_M vooralsnog niet anders worden bepaald dan op grond van een arbitraire keuze. Daarom is gekozen voor een benadering op stroomniveau. Vanwege de betrekkelijke eenvoud komt een enkelstrooksrotonde dan het meest daarvoor in aanmerking. Op grond van de resultaten van de geaggregeerde capaciteitschatting voor de enkelstrooksrotonde Schipluiden is gekozen voor t_M = 1,7 s/pae en ρ =1 (zie par. 4.5.1). Dit resultaat is in de kalibratie op stroomniveau van de turborotondes steeds weer getoetst.

4.4.2 Kritisch hiaat

Het kritisch hiaat van een individuele bestuurder kan niet worden gemeten. Wel kan het kritisch hiaat van een groep weggebruikers worden afgeleid uit het verschil tussen het geaccepteerde hiaat en het grootste verworpen hiaat van elk van de bestuurders (Miller, 1972). Hiervoor is de maximum likelihood benadering toegepast, gebaseerd op een log-normale verdeling (Brilon & Koenig & Troutbeck, 1997; Hagring, 1998). De likelihood-functie die wordt gemaximaliseerd, luidt:

$$\ell = \prod_p \{G(a_p) - G(r_p)\} \qquad (4.38)$$

Hierin is: G : log-normale distributiefunctie van het kritisch hiaat;
a_p : waarde van het hiaat dat door bestuurder p is geaccepteerd;
r_p : waarde van het grootste hiaat dat door bestuurder p is verworpen.

Schijnconflict, bruto en netto kritisch hiaat

Zoals in paragraaf 4.2.8 is toegelicht, is het niet mogelijk om een waarde voor het kritisch hiaat van het schijnconflict vast te stellen. Wel is het mogelijk de vraag te beantwoorden of het afslaande verkeer al dan niet invloed heeft. Daartoe worden de combinaties van grootste verworpen en geaccepteerde hiaten verdeeld in:

1) hiaten waarin zich mogelijk wel ($t_{Cij\ bruto}$ ='bruto kritisch hiaat') en
2) hiaten waarin zich zeker geen afslaand voertuig bevond ($t_{Cij\ netto}$ ='netto kritisch hiaat').

Uit Tabel F.3.1 blijkt dat het bruto kritisch hiaat systematisch hoger is dan dat waaruit het schijnconflict is geëlimineerd, zodat geconcludeerd moet worden dat het schijnconflict invloed heeft.

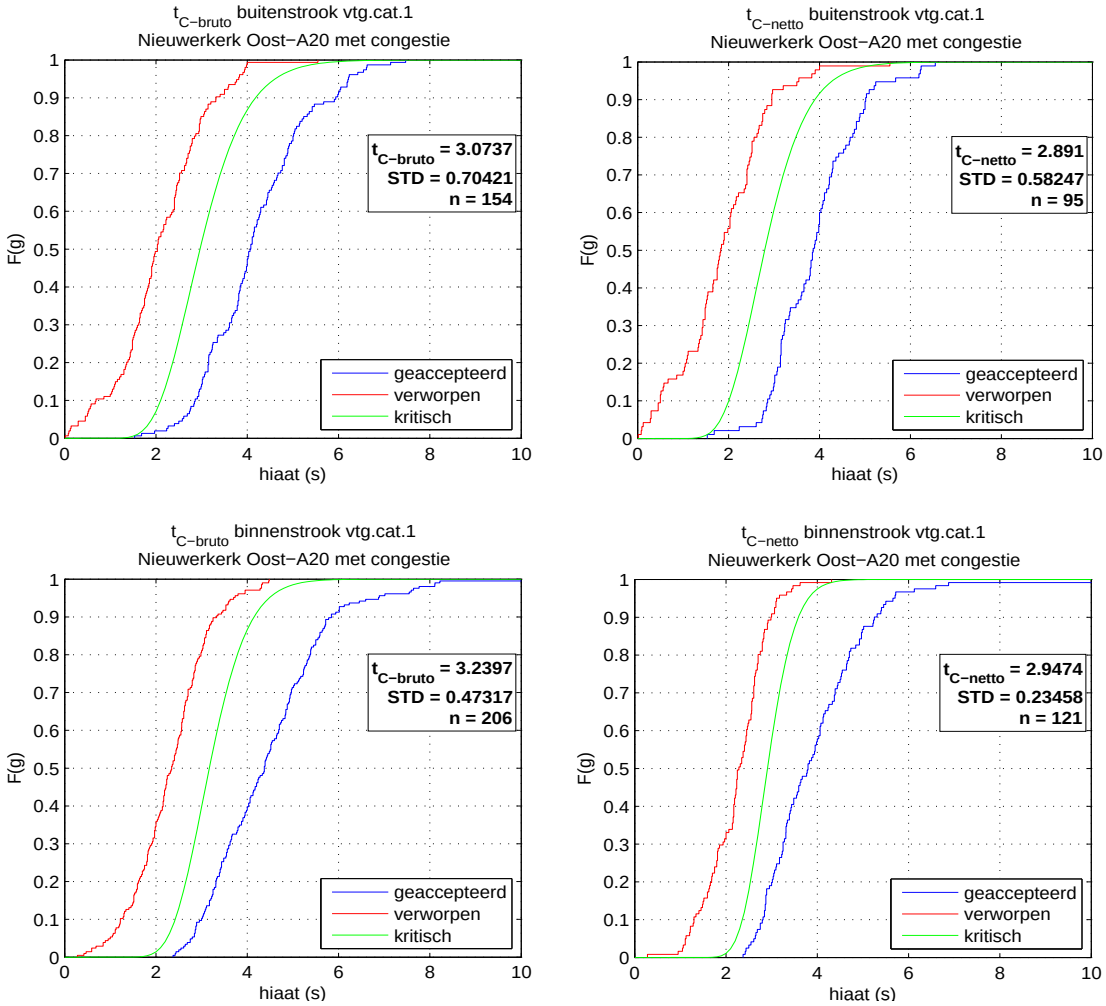
Kritisch hiaat buitenste en binnenste rotondestrook

Als de rotonde voor de toerit uit twee rijstroken bestaat, zijn de kritische hiaten voor de buitenste en de binnenste rotondestrook onderscheiden. Ongeacht de strook waarop de eerste auto (kopauto) rijdt, is de auto die het hiaat afsluit bepalend voor de strook waaraan het hiaat moet worden toegekend: aan de binnenste of aan de buitenste rotondestrook (Hagring, 1998). Immers, niet de auto die al is gepasseerd bepaalt het risico voor de bestuurder bij oprijden,

maar de auto die het hiaat afsluit. Overigens houdt deze meetmethode in, dat er verworpen hiaten t_r = 0 s gemeten worden.

In Tabel F.3.2 blijkt dat de waarden van het netto kritisch hiaat op de binnenste rotondestrook hoger zijn dan op de buitenste. Voor het bruto kritisch hiaat is dat niet altijd het geval, omdat soms de invloed van het schijnconflict op het kritisch hiaat van de binnenste rotondestrook verwaarloosbaar klein is. Figuur 4.4-1 geeft de verdelingen van de onderscheiden kritische hiaten voor één enkele toeritstrook naar een tweestrooks rotondesegment uit Tabel F.3.2.

Nadere beschouwing van Figuur 4.4-1 maakt duidelijk, dat aan de verschillen tussen het kritisch hiaat voor de binnenste en de buitenste rotondestrook geen absolute waarde kan worden toegekend. Op de buitenste rotondestrook doen zich situaties voor waarin het grootste



Figuur 4.4-1 Voorbeeld van verdelingen van de kritische hiaten met die van de grootste verworpen en geaccepteerde hiaten

verworpen hiaat net iets meer dan 0 seconde is. Bij het kritisch hiaat op de binnenste rotondestrook doet zich dat niet voor. Maar ook bij de geaccepteerde hiaten is sprake van een dergelijke verschuiving. De oorzaak hiervan is het verschil in oprijafstand tot beide stroken. Bijvoorbeeld een auto vanaf de toerit kan al oprijden nadat een fractie eerder een auto op de binnenste rotondestrook is gepasseerd. Beschouw het passagetijdstip van de auto op de binnenste rotondestrook als het nultijdstip. Als dan 3 s later een auto op de buitenste rotonde

passeert, is het gemeten geaccepteerde hiaat 3 s. Maar het hiaat om in te voegen wordt door de factoren op de binnenstrook bepaald. Terwijl de auto opreed direct na het passeren van de auto op de binnenste rotondestrook, sluit deze in werkelijkheid achter die auto aan met een tijdsafstand van bijvoorbeeld 2,3 s. Als daarachter op de binnenste rotondestrook een auto passeert op tijdstip t = 5 s, dan bedraagt de volgafstand 5-2,3 = 2,7 s. In feite is dat alles zeer ruim. Maar ondertussen is wel een geaccepteerd hiaat gemeten van 3 s. Met een bijbehorend grootste verworpen hiaat van 0,5 s levert dat een zeer klein kritisch hiaat op voor de buitenste rotondestrook. Voor het kritisch hiaat van de binnenste rotondestrook werkt dit verschijnsel tegengesteld. Dit voorbeeld laat zien, dat voor de vergelijking van de waarden van het kritisch hiaat het beste is om de waarden voor de buitenste en binnenste rotondestrook te middelen.

Invloed binnenste rotondestrook op hiaatacceptatie rechter toeritstrook

Op traditionele tweestrooksrotondes rijdt het verkeer vanaf de rechter toerit over het algemeen pas op als ook een hiaat op de binnenste rotondestrook aanwezig is. Hagring (1998) vindt voor een paar kritische hiaten vanaf de rechter toeritstrook de volgende waarden: $t_{CU,2}$ = 4,3 s/vtg en $t_{CI,2}$= 4,0 s/vtg. Een hiaatschatting waarin een auto op de binnenste rotondestrook ook een voorwaarde is voor het begin van een hiaat op de buitenste rotondestrook, is onrealistisch voor een turborotonde, omdat een auto vanaf de rechter strook nooit invoegt in de binnenste rotondestrook. Wel kan het verkeer op de binnenste rotondestrook enige invloed hebben op de grootte van het kritisch hiaat dat de bestuurders op de rechter toeritstrook in acht nemen. Dat blijkt uit het verschil tussen de waarden van $t_{CU,2}$ op de oosttak van de rotonde Nieuwerkerk aan de IJssel tijdens congestie. Inclusief de gevallen waarin tijdens het hiaatacceptatieproces ook op de binnenste rotondestrook een auto passeert is $t_{CU2\ incl\ ,\ bruto}$ = 3,37 ± 0,51 s/pae. Zonder dat een auto op de binnenstrook passeert, is $t_{CU2\ excl\ ,\ bruto}$ = 3,12 ± 0,45 s/pae. Dit betekent dus een verhoging van het kritisch hiaat met 8 %. Gelet op de spreiding van beide waarden is met 95 % zekerheid deze verhoging niet groter dan 15 %. Deze verhoging vindt plaats onder invloed van meer dan de helft van het rotondeverkeer (55%) op de binnenste rotondestrook. Tegen die achtergrond kan worden geconcludeerd, dat een beperkte invloed van het verkeer op de binnenste rotondestrook is gemeten. Veronderstelling 1 van paragraaf 4.1.5 (blz. 73) wordt niet verworpen. Dit betekent, dat geconcludeerd kan worden, dat het verkeer op de binnenste rotondestrook geen constituerende rol speelt in de beslissing al dan niet op te rijden, maar alleen een verstorende. Het lijkt dus verantwoord om uit te gaan van de waarde van het kritisch hiaat op de buitenste rotondestrook (vermenigvuldigd met alleen het verkeer op de buitenste rotondestrook), gemeten mede onder invloed van het verkeer op de binnenste rotondestrook.

Consistentie en homogeniteit

Zoals in het vervolg zal blijken, treden er verschillen op tussen de schattingen op basis van hiaatwaarnemingen en die op basis van stroomwaarnemingen. Daarom is een onderzoek van belang naar afwijkingen ten opzichte van de assumpties van de hiaatacceptatie-theorie. Bij het kritisch hiaat gaat het om de aannamen, dat bestuurders consistent zijn in hun hiaatkeuze en een homogene populatie vormen (assumpties 1 en 2 in paragraaf 4.2.5).

Onderscheiden worden de ‘bruto-inconsistentie’ (inclusief schijnconflict) en de ‘netto-inconsistentie’ (waaruit de invloed van het schijnconflict is geëlimineerd). Het resultaat is weergegeven in Tabel F.3.4. Hieruit blijkt, dat 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 (blz. 80) en de werkelijkheid neemt bij toenemende complexiteit dus toe. De vermelde waarden voor de standaardafwijking in Tabel F.3.1 laten zien, dat deze voor de toeritstroken naar de turborotondes veel groter is dan voor de enkelstrooksrotondes. Het is niet aannemelijk dat dit het gevolg is van een andere populatie bestuurders. Maar binnen dezelfde populatie bestuurders wordt kennelijk verschillend gereageerd op een toename van verstorende factoren in het beoordelen van hiaten. Dat geldt kennelijk niet alleen voor de toeritstroken naar tweestrooks rotondesegmenten van turborotondes, maar ook die naar de enkelstrooks segmenten. De combinatie van toenemende inconsistentie en grotere spreiding duidt op grotere verschillen tussen bestuurders naarmate er meer verstorende factoren optreden. Daarmee is ook assumptie 2 met betrekking tot homogeniteit bij toenemende complexiteit kwestieus.

4.4.3 Oprijvolgtijd

Als oprijvolgtijd[145)] is de mediaan gehanteerd van de tijd tussen het passeren van de achterkant van auto's die achter elkaar vanuit een wachtrij op een toeritstrook de rotonde oprijden en daarbij gebruik maken van eenzelfde hiaat. Deze keuze wordt gemotiveerd in Bijlage F.3.2. met de resultaten in Tabel F.3.6.
De oprijvolgtijd van personenauto's varieert met de vorm van de rotonde. Deze is het kleinst (1,8 s/pae) voor een enkelstrooksrotonde met de geringste uitwijking van de oprijcurve. Als de oprijcurve meer uitwijkt (zoals op Nederlandse rotondes gebruikelijk is), is deze groter (2,1 s/pae). Op toeritten naar turborotondes zijn de oprijvolgtijden nog iets hoger:

- linker toeritstroken: 2,14 – 2,36 s/pae;
- rechter toeritstroken: 2,34 – 2,91 s/pae.

Deze waarden zijn vergelijkbaar met of zelfs hoger dan die Hagring (1998) heeft gevonden in Zweden (ca. 2,4 s/vtg).
De invloed van het schijnconflict op de oprijvolgtijd naar een enkelstrooksrotonde is gering, maar op de toeritten naar rotondes met meer dan één strook kan deze de oprijvolgtijd verhogen. Hetzelfde geldt enigszins voor de invloed van het verkeer op de binnenste rotondestrook op de oprijvolgtijd vanaf de rechter toeritstrook.

4.4.4 Conclusies schatting kritisch hiaat en oprijvolgtijd uit hiaatmetingen

Het is niet eenvoudig om in de getallenreeksen van Tabel F.3.1 t/m F.3.4 een structuur te ontdekken. Afgerond op één decimaal nauwkeurig varieert het bruto kritisch hiaat van minimaal 3,1 s/pae tot maximaal 3,8 s/pae, terwijl het netto kritisch hiaat varieert van minimaal 3,0 s/pae tot maximaal 3,5 s/pae. In Tabel 4.4.1 zijn de getallen indicatief in opeenvolgende grootte van het bruto hiaat geordend in relatie tot de aard van de conflicten: hoofdconflict, nabij schijnconflict, veraf schijnconflict en aantal 'schijnbewegingen', d.w.z. verkeersstromen die kennelijk wel de aandacht vragen maar geen echt conflict kunnen opleveren.

---

[145] De waarden in Tabel F.3.6 gelden voor uitsluitend personenauto's [s/pae]. De uitkomsten voor alle voertuigen samen liggen 5 % hoger. Die verhoging moet worden toegepast voor een vergelijking met waarden voor oprijvolgtijden in veelal buitenlandse studies.

Tabel 4.4.1 Kritische hiaten en oprijvolgtijden geordend naar ligging toeritstrook

Ligging toeritstrook	$t_{C\ bruto}$ [s/pae]	$t_{C\ netto}$ [s/pae]	$t_{F\ bruto}$ [s/pae]	Hoofd-conflict	Schijn-conflict nabij	Schijn-conflict veraf	Schijn-beweging
tak	3,1	3,0	2,1	1	1		
linker strook zijtak	3,2	3,1	2,3	2	1		
linker strook hoofdtak	3,5	3,2	2,3	1	1		1
rechter strook zijtak	3,7	3,6	2,8	1		1	1 (+1 by-pass)
rechter strook hoofdtak	3,8	3,5	2,3	1		1	1

Tabel 4.4.1 laat een samenhang zien tussen de complexiteit van de schijnconflicten en schijnbewegingen enerzijds en de grootte van het kritisch hiaat van de werkelijke (resterende) conflicten anderzijds. In deze tabel zijn ook de waarden voor de bruto oprijvolgtijd geplaatst. Ook die vertonen een zekere relatie met genoemde complexiteit in het beoordelen van de situatie van de rotondestroken. Alleen is de volgorde in oplopende grootte voor de rechter toeritstroken afwijkend[146].

4.5 Kalibratie parameters capaciteitsmodel op stroomniveau

De parameters van (multi-)lineaire capaciteitsformules worden bepaald op basis van gegevens van verzadigde verkeersstromen. De parameters van de (samengestelde) exponentiële capaciteitsformules zijn bepaald op grond van hiaatgegevens (par. 4.4) en worden in deze paragraaf in principe gevalideerd op basis van gegevens van verzadigde verkeersstromen. Zo nodig worden ze op grond van gegevens van verzadigde verkeersstromen bijgesteld via de parameters δ *of* ξ en ψ. Daarbij is een uitgangspunt dat de waarden van t_C en t_F wel hoger maar niet lager kunnen worden (gelet op de vereenvoudigende assumpties die aan de hiaattheorie ten grondslag liggen). Ook is de eenvoud van de modelstructuur een belangrijk keuzecriterium[147]. De uiteindelijke keuze van de te gebruiken parameters kan niet anders dan op arbitraire gronden gemaakt worden.
Successievelijk worden in de paragrafen 4.5.1 t/m 4.5.3 de parameters van de enkelstrooksrotonde, de hoofdtak van de turborotonde en de zijtak van de turboronde bepaald. In paragraaf 4.5.4 wordt het effect van een betere verdeling van het verkeer op de rotondestroken onderzocht. In paragraaf 4.5.5 wordt als gevolg van het ontbreken van voldoende wachtrijen een benadering gegeven voor de parameters van de rechter toeritstroken. Deze paragraaf wordt afgesloten met een vergelijking met Duitse compacte concentrische tweestrooksrotondes. In Bijlage F.4 is het proces gedocumenteerd.

4.5.1 Schatting enkelstrooksrotonde op stroomniveau

Omdat het waardebereik van de capaciteitswaarnemingen op de rotondes Bergschenhoek en Papendrecht te klein is, kunnen daarvoor geen modelparameters worden geschat in conflict-

[146] Op stroomniveau zijn met de beschikbare data voor $t_{F\ effectief}$ waarden gevonden met een afwijkende opeenvolging in grootte.

[147] Als ρ =1 gaan de meer complexe modellen van Troutbeck en Hagring over in de meer eenvoudige van Tanner en Fisk.

stroommodellen (Fortuijn en Van Beinum, 2007). De data van deze rotondes zijn niet samengevoegd met die van de rotonde Schipluiden. Enerzijds wijkt de vormgeving te veel af (Bergschenhoek) en anderzijds weken de omstandigheden te veel af van een standaardsituatie, door mist die tijdens de metingen optrad (Papendrecht).

De correlaties tussen de verschillende variabelen voor de rotonde Schipluiden, zowel tussen de te schatten variabele C_E en elk van de verklarende variabelen, als tussen de verklarende variabelen onderling, zijn weergegeven in Figuur F.4-1. Zoals is te verwachten, is de correlatie van de toeritcapaciteit (C_E) met de rotonde-intensiteit (Q_R) sterk (R^2 = 0,94), maar het verband met het afslaande verkeer Q_S is niet zo sterk (R^2 = 0,31). Voorts blijkt dat de correlatie tussen afslaand verkeer en rotondeverkeer met R^2 = 0,28 het risico oplevert, dat er een toevallige vertekening optreedt in parameterwaarden wanneer Q_S als onafhankelijke variabele naast Q_R wordt geïntroduceerd. De verdeling tussen gelede en ongelede vrachtauto's is echter geheel onafhankelijk (R^2 = 0,02).

Allereerst worden van vier modellen[148]: Bovy^T, Siegloch^{CS} (Brilon-Stuwe^{CS}), Tanner^{CS} en Troutbeck^{CS} de parameters *simultaan* geschat. Opvallend is, dat het lineaire model Bovy^T het niet zo veel slechter doet dan de exponentiële modellen[149] (Tabel F.4.1*)*. Daarbij valt op dat het model Siegloch^{CS} een waarde voor het kritisch hiaat (4,1 s/pae) oplevert, dat in het licht van de resultaten uit paragraaf 4.4.2 zeer hoog is. Omdat de spreiding van het model Siegloch^{CS} groter is dan dat van de modellen Tanner^{CS} en Troutbeck^{CS}, zijn in het vervolg modellen gebaseerd op het model van Siegloch (dat geen rekening houdt met een minimum afstand tussen voertuigen), buiten beschouwing gelaten. De simultane schatting levert in de modellen Tanner^{CS} en Troutbeck^{CS} een zeer lage waarde voor de minimum volgtijd (t_M = 1,2 à 1,4 s/pae) op, terwijl ook de waarden voor het kritisch hiaat t_C hoger zijn dan die uit de hiaatmetingen. De conclusie is, dat een simultane schatting van de parameters op stroomniveau op basis van de beschikbare dataset geen reële parameterwaarden oplevert voor de exponentiële modellen.

De schattingsprocedure van deze modellen op stroomniveau zijn voortgezet, gebruik makend van de resultaten uit de hiaatmetingen (*sequentiële schatting*). In de vervolgstap wordt t_C =3,1 s/pae en t_F = 2,1 s/pae gebruikt. De waarde van het schijnconflict is gefixeerd op een waarde die ligt tussen Tanner^{CS} en Troutbeck^{CS} (Tabel F.4.1): $d = (0{,}30+0{,}22)/2 = 0{,}26$[150]. Ondertussen zijn ook verkennende capaciteitschattingen uitgevoerd op basis van de onderzoeken op de turborotondes (zie verderop). Gebruikmakend van de resultaten daarvan wordt ervoor gekozen om in deze sequentiële schattingsfase uit te gaan van vaste pae-waarden:

---

[148] Zie voor de betekenis van de symbolen ^{T} en ^{CS} blz. 75 en 92.

[149] De gevonden waarden van t_C en t_M blijken bijvoorbeeld voor het model van Troutbeck een curve op te leveren die alleen in de uiterste waarden van Q_{RS} duidelijk van een rechte afwijkt, zie *Figuur F.4-3.*

[150] Op grond van de schattingsresultaten van de turborotondes is de waarde van *d* aangepast. Gekozen is voor d_K = 0,22, d_H = 0,12 en d_{HR}= -0,13. In Tabel F.4.3 is ook een schattingsresultaat opgenomen waarin deze waarden (op basis van een ingeschatte verdeling van de herkomsten) zijn gebruikt (met als gevolg een verwaarloosbare verhoging van de spreiding met 0,1 pae/h).

- ongelede vrachtwagens g_2=1,9 pae en
- gelede vrachtauto's g_3 = 2,7 pae.

Om het verschil tussen de resultaten op basis van de gebruikte parameters in het model van Troutbeck en de capaciteitsmetingen te expliciteren is aan het model een algemene correctiefactor δ toegevoegd (zie vergelijking (4.35)). Gevarieerd is met de waarde van de minimum volgtijd t_M. Die is in stapjes verhoogd van 1,3 naar 1,7 s/pae. Bij een waarde t_M = 1,3 heeft de clusteringconstante ρ een waarde ρ =1,55. Die is onrealistisch, immers de hiaatverdeling van het rotondeverkeer benadert in Figuur F.4-2 redelijk goed een verschoven exponentiële verdeling. Bij t_M = 1,7 s/pae is de clusteringconstante ρ =1, terwijl de algemene correctiefactor dan een waarde δ = 0,98 heeft.
Het aantrekkelijke van dit resultaat is, dat:

- het bereikt wordt met een waarde ρ =1 die hoort bij het model van Tanner, dat het meest eenvoudige exponentiële model is dat rekening houdt met een minimum volgtijd,

terwijl:

- het verschil met de resultaten op basis van de hiaatmetingen verwaarloosbaar klein is, en
- de spreiding met 70,2 pae/h slechts 0,6 pae/h hoger is dan de aanvankelijke waarde van 69,6 pae/h waarmee dit proces startte.

Bij analyse van de rol die de algemene correctiefactor δ vervult, blijkt deze sterk samen te hangen met de waarde van $\xi \cdot t_{F\ hiaatmeting}$. Wanneer in dit model voor het kritisch hiaat de waarde t_C = 3,17 s/pae (ψ=1,02) en voor de oprijvolgtijd t_F = 2,13 s/pae (ξ=1,01) wordt ingevuld (zie Tabel F.4.3), kan voor een enkelstrooksrotonde de algemene correctiefactor achterwege blijven (δ = 1).

Dit resultaat bij een waarde ρ =1 is opvallend. Het ligt namelijk voor de hand dat in een verkeersstroom (door initiële snelheidsverschillen) veelal sprake is van een bovenproportionele clustering, die meer overeenkomt met een waarde ρ <1. Uit de analyse in Bijlage F.1.2 blijkt echter, dat de spreiding van de volgtijd van voertuigen die geclusterd rijden een plausibele verklaring voor dit resultaat oplevert. Dit betekent dat het model van Troutbeck (met ρ <1) alleen in beeld komt, als dicht bij de rotonde op een tak met een dominante verkeersstroom zich een verkeerslicht bevindt. Zonder nader onderzoek kan echter niet de vraag beantwoord worden, wat de waarde van ρ dan moet zijn.

In Figuur F.4-3 en Figuur F.4-4 zijn het model van Bovy en het aangepaste model van Troutbeck^{CS} met elkaar vergeleken, waaruit blijkt dat de verschillen niet groot zijn.

4.5.2 Schatting linker toeritstrook hoofdtak turborotonde

Door de vormgeving van de turborotonde maakt het afslaande verkeer vanaf de voorliggende zijtak nauwelijks gebruik van de aanliggende afritstrook van de hoofdtak (*S1*), maar wel van de buitenste afritstrook (*S2*). Dit betekent dat het afslaande verkeer dat wel gebruik maakt van de aanliggende afritstrook (*S1*) voornamelijk afkomstig is van het voorliggende rotondesegment (Q_{S1H}). Opmerkelijk is, dat uit de correlatieberekeningen in de data-analyse naar voren komt, dat voor de noordtak het rotondeverkeer en afslaande verkeer vrij sterk (R^2=0,69) negatief is gecorreleerd: het afslaande verkeer Q_{SH} belemmert kennelijk het oprijden van het rotondeverkeer vanaf de voorliggende tak (Q_{RK}). Zie Figuur F.4-5.

De parameterschatting op stroomniveau bevestigt het resultaat uit de hiaatmetingen, dat het kritisch hiaat van de linker toeritstrook van de hoofdtak van de turborotonde groter is dan van de enkelstrooksrotonde. De waarde van het kritisch hiaat op stroomniveau is $t_{C\ effectief}$ = 3,75 à 3,91 s/pae (Tabel F.4.11; vgl. enkelstrooksrotonde t_C = 3,17 s/pae). Maar in tegenstelling tot het resultaat uit hiaatmetingen is ook de oprijvolgtijd veel groter: $t_{F\ effectief}$ = 2,67 s/pae, vgl. enkelstrooksrotonde t_F = 2,13 s/pae. De meer complexe situatie heeft kennelijk een grotere invloed op het oprijden dan uit $t_{F\ hiaatmeting}$ is gebleken. Evenals bij de enkelstrooksrotonde blijken de algemene correctiefactor δ en de specifieke factor ξ voor de t_F onderling praktisch uitwisselbaar te zijn (zie de waarden voor de spreiding in Tabel F.4.11).

Qua invloed van het afslaande verkeer wijzen de schattingsresultaten in dezelfde richting als de correlatiegegevens: bij de aansluiting van de hoofdtak van een turborotonde heeft het afslaande verkeer Q_{S1} een andere invloed op de toeritcapaciteit C_E dan bij de enkelstrooksrotonde werd gevonden. Verondersteld kan worden, dat dit samenhangt met de afwezigheid van Q_{S1K}. In ieder geval blijkt de stroom Q_{S1H} eerder een positief dan een negatief effect op de toeritcapaciteit te hebben. Het onderzoeksmateriaal laat echter niet toe om over het verschil in invloed tussen Q_{S1K} en Q_{S1H} een definitieve uitspraak te doen.

Ten slotte kan worden opgemerkt, dat een lineair model (s = 59 pae/h) op een toeritstrook naar een enkelstrookssegment van een turborotonde niet veel onderdoet voor een exponentieel model (s = 58 pae/h, Tabel F.4.11 en Figuur F.4-7).
In Bijlage F.4.3 wordt meer in detail verslag gedaan van het kalibratieproces van de capaciteitsmodellen voor de linker toeritstrook van de hoofdtak van de turborotonde.

4.5.3 Schatting linker toeritstrook zijtak turborotonde

De correlatie tussen toeritcapaciteit en rotondeverkeer is evident (Figuur F.4-8).
Het afslaand verkeer vanaf de voorliggende hoofdtak maakt alleen op de turborotonde Rotterdam gebruik van de aanliggende rijstrook (*S1*) van de zijtak. Op de turborotonde Nieuwerkerk aan den IJssel gebruikt dat verkeer zowel naar het westen als het oosten een by-pass. Toch wordt in de analyse van de correlaties geen negatieve relatie gevonden tussen Q_{S1H} en Q_{RUK}. Dat wijst erop, dat op deze rotonde tegenover de zijtakken geldt: $Q_{RUH} >> Q_{RUK}$. En alleen tegenover de westtak zijn Q_{RI} en Q_{S1H} zwak negatief gecorreleerd. Dat betekent dat de analyse van de wisselwerking tussen Q_{RUK} en Q_{S1H} voor deze takken problematisch is.

Uit het kalibratieproces blijkt, dat een lineair model het effect van de verdeling van het verkeer over twee rotondestroken niet goed beschrijft: de gevonden waarden voor de parameters b_1 en b_2 zijn tegengesteld aan hetgeen logisch is (zie Tabel F.4.12). Ook wijkt de toeritcapaciteit van een lineair model bij zowel lage als hoge rotonde-intensiteiten sterk van de waarnemingen af.

De laatste stap in het schattingsproces betreft de kalibratie van het exponentiële capaciteitsmodel voor de linker toeritstrook naar een tweestrookssegment van de turborotonde. In de schattingen van de gedragsparameters op basis van de hiaatmetingen was opvallend, dat de kritische hiaten t_{CU} en t_{CI} en oprijvolgtijd t_F niet hoger waren dan die van de enkelstrooksrotonde. De kalibratie op stroomniveau laat eenzelfde beeld zien voor de oprijvolgtijd. In het vervolg van het schattingsproces wordt t_F = 2,25 s/pae gebruikt. Bij het

kritisch hiaat is dat anders: het gebruik maken van hiaten verloopt kennelijk moeizamer dan op basis van hiaatmetingen verwacht mag worden. Ook is de verhouding tussen de waarden van t_{CU} en t_{CI} precies andersom dan in de waarden uit de hiaatacceptatie. Op basis daarvan ligt het voor de hand[151] om voor een capaciteitsmodel voor de linker toeritstrook dezelfde waarde voor het kritisch hiaat voor de buitenste en binnenste rotondestrook te hanteren: $t_{CU\ effectief} = t_{CI\ effectief} = 3{,}96$ s/pae (omgerekend met $\psi = 1{,}26$). Het grote verschil tussen het kritisch hiaat verkregen uit hiaatmetingen en capaciteitsmetingen (+26 %), zou er op kunnen wijzen, dat in situaties waarin het beoordelen van bruikbare hiaten complexer is (in vergelijking met de enkelstrooksrotonde), het gedrag van bestuurders minder homogeen is dan assumptie 2 (blz.81) veronderstelt. De veel grotere spreiding in de waarde van het kritisch hiaat in de schatting vanuit de hiaatwaarnemingen (Tabel F.3.1) ondersteunt dit vermoeden.
In Bijlage F.4.4 wordt meer in detail verslag gedaan van het kalibratieproces van de capaciteitsmodellen voor de linker toeritstrook van de zijtak van de turborotonde.

4.5.4 Effect van verdeling verkeer over twee rotondestroken op de capaciteit van de linker toeritstrook zijtak

Relatie tussen strookverdeling in vijf-minutenwaarnemingen en uurperioden

De metingen zijn verricht per vijf minuten. Daarop zijn de parameters geschat, terwijl een capaciteitsmodel met uurcijfers werkt. Per vijf minuten zijn de fluctuaties in de verdeling tussen verkeer op de binnenstrook en de buitenstrook groter dan in een uur. In een uurperiode lijkt het verkeer beter over twee rotondestroken verdeeld dan het geval is in perioden van vijf minuten. Dat geldt zowel in de onderzoeksituatie als in een prognosesituatie (gegeven een richtingverdeling). Op basis van de gegevens van de rotonde Rotterdam en Nieuwerkerk aan den IJssel is die relatie tussen beide onderzocht (zie Bijlage F.4.5).

Verdeling rotondeverkeer over twee stroken

Tabel F.4.25 geeft de gemeten verdeling van het verkeer per 50 à 60 minuten over de rotondestroken weer. In Tabel 4.5.1 wordt het aandeel van de binnenste strook vergeleken met het aandeel van de zwaarst belaste strook gemiddeld over de vijf-minutenperioden. De standaardafwijkingen geven een indruk van de variaties.

Tabel 4.5.1 Verdeling van het verkeer over de rotondestroken

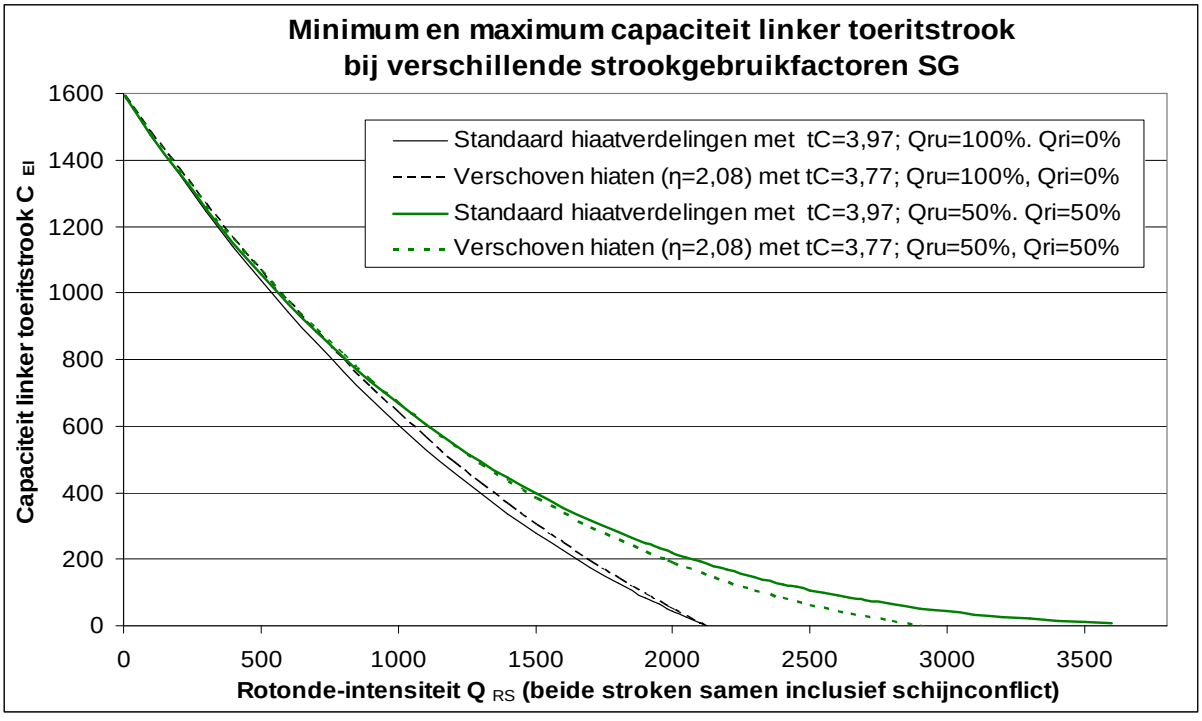
Rotondestrook	$Q_{R\,I} / (Q_{RU} + Q_{RI})$	Std	$Q_{R\ zwrst} / (Q_{RU} + Q_{RI})$	Std	*Percentage* $Q_{RI} > Q_{RU}$
N'kerk oost	0,54	0,09	0,58	0,06	73%
N'kerk west	0,66	0,09	0,68	0,07	93%
R'dam oost	0,54	0,10	0,58	0,06	54%

Afgezien van de situatie Nieuwerkerk west (waar sprake was van een uitzonderlijke situatie door de keerbeweging, zodat de hoofdstroom meer lijkt op een linksaf beweging, waarvoor een knierotonde met twee rotondestroken linksaf een meer geëigende oplossing zou zijn), blijkt het verkeer vrij evenwichtig verdeeld over de twee rotondestroken. Opvallend is, dat

[151] Zie ook de beschouwing bij Figuur 4.4-1 op blz. 97.

veelal de binnenste rotondestrook zwaarder is belast. Dit in tegenstelling tot wat op concentrische tweestrooksrotondes het geval is.

De veronderstelling (zie paragraaf 4.1.5) is, dat een evenwichtige verdeling van het rotondeverkeer ook de capaciteit van de linker toeritstrook van de zijtak ten goede komt. Theoretisch is dit effect met behulp van simulatieberekeningen door Van Beinum in samenwerking met de auteur aangetoond (Fortuijn, 2009b).
De vraag is nu, of in werkelijkheid er wellicht een zodanige synchronisatie van de hiaten in beide rotondestroken plaatsvindt, dat het theoretisch positieve effect in de praktijk niet of veel minder blijkt op te treden. Om dit te onderzoeken is vergelijking (4.37) ingevuld voor het strookgebruik. Voor de vervanger van de minimum volgtijd is de waarde $\eta = 2{,}08$ s/pae gevonden. Deze wijkt inderdaad in ongunstige zin af van de minimum volgtijd $t_M = 1{,}7$ s/pae. Daarom is onderzocht in hoeverre deze waarde een nadelige invloed heeft op het positieve effect van een betere verdeling van het rotondeverkeer. Het maximale verschil (bij een rotonde-intensiteit van 2100 pae/h) tussen een fifty-fifty verdeling (op uurbasis) en alles op één rotondestrook blijkt voor de capaciteit van de linker toeritstrook geen 186 pae/h maar 170 pae/h te zijn. De oorzaak van dit wel zeer kleine verschil is gelegen in een compensatie die optreedt in het schattingsresultaat van het kritisch hiaat t_C (geen 3,97 s/pae in de standaardbenadering maar t_C =3,77 s/pae in de aangepaste strookgebruikfunctie). Hierdoor treedt in de standaardbenadering niet zozeer een overschatting van de toeritcapaciteit op bij een evenwichtige verdeling van het rotondeverkeer, maar een onderschatting van de toeritcapaciteit bij een onevenwichtige verdeling. Bij een rotonde-intensiteit van 800 à 1000 pae/h bedraagt die onderschatting 35 pae/h. Figuur 4.5-1 brengt de verschillen tussen de standaard en aangepaste benadering in beeld (hierin zijn de effecten beschreven in Bijlage F.4.5 verdisconteerd).



Figuur 4.5-1 Effect van de verdeling rotondeverkeer over twee rotondestroken op de toeritcapaciteit bij verschillende strookgebruikfuncties

De conclusie is, dat weliswaar het effect van een meer evenwichtige verdeling van het rotondeverkeer kleiner is dan op grond van assumptie 5 (paragraaf 4.2.5) wordt berekend, maar dat deze afwijking niet zodanig is, dat veronderstelling 2 uit paragraaf 4.1.5 (blz.73) moet worden verworpen. Integendeel.

4.5.5 Capaciteit rechter toeritstroken hoofdtak en zijtak turborotonde

Van de rechter toeritstroken naar de turborotondes zijn geen goede capaciteitsmetingen beschikbaar. Op de oosttak van de rotonde Rotterdam zijn in het geheel geen wachtrijen gemeten die zich gedurende vijf minuten voordeden. Hetzelfde geldt voor de westtak van de rotonde Nieuwerkerk aan den IJssel. Op de overige takken van die rotonde zijn op de rechter rijstrook zo nu en dan wachtrijen gemeten. Het probleem daarvan is echter, dat zich daarin korte onderbrekingen voordeden als verschillende auto's van eenzelfde hiaat gebruik konden maken. Daardoor is het niet mogelijk capaciteitsfuncties te schatten.

Een globale benadering van een capaciteitsfunctie kan verkregen worden, door evident te lage waarden van de toerit-intensiteit (die bij vooral lage rotonde-intensiteiten voorkomen) niet te gebruiken. In Bijlage F.4.6 wordt de wijze van benadering van de capaciteit van de rechter toeritstroken nader toegelicht. Opgemerkt kan worden, dat de werkelijke capaciteit vermoedelijk hoger is. De op deze wijze verkregen parameters leveren dan een onderschatting op.

Uiteraard bepaalt de richtingverdeling of de strookcapaciteit van beide stroken kan worden benut. Op de hoofdtak van een turborotonde is dat het geval bij veel rechtdoorgaand verkeer. Op een zijtak is daar veel rechtsafslaand verkeer voor nodig. De hoge mate van determinatie van het strookgebruik op de toerit van een turborotonde is overigens de belangrijkste reden om op turborotondes alleen met capaciteitsfuncties per toeritstrook te werken.

4.5.6 Vergelijking met concentrische tweestrooksrotondes

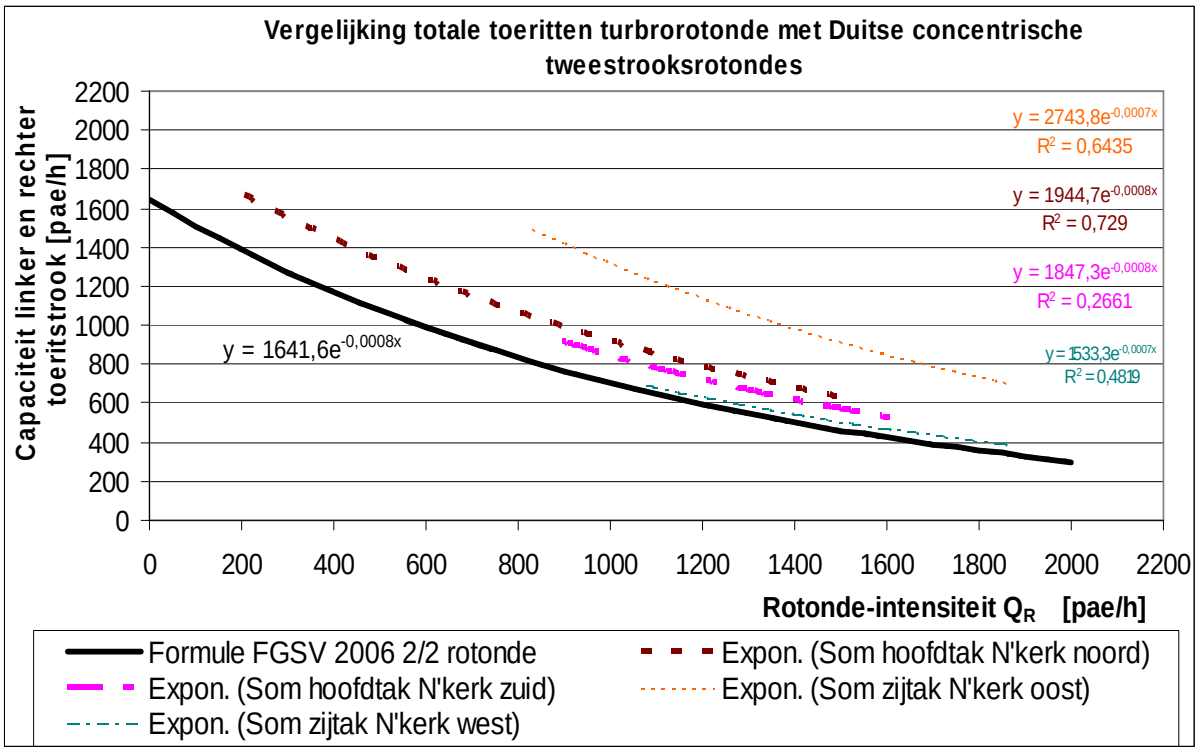
In Nederland zijn geen capaciteitsmetingen op concentrische tweestrooksrotondes met enkelstrooks afvoertakken (cf. CROW-publicatie 126, Figuur 22) beschikbaar. Brilon en Bäumer (2004) hebben hiernaar in Duitsland onderzoek gedaan en geconstateerd dat de linker toeritstrook veel slechter wordt benut dan de rechter. De bereidheid om de linker rijstrook te gebruiken neemt toe, naarmate de afstand die op de rotonde afgelegd wordt, groter is. Op kleine concentrische tweestrooksrotondes is daarom een relatie gelegd tussen het percentage verkeer op de linker toegangsstrook (y) en het aandeel linksafslaand verkeer (x) op de toerit: $y = 0{,}2814 \cdot x + 0{,}0596$ ($R^2 = 0{,}13$). Hoewel de spreiding groot is, wordt door de auteurs opgemerkt, dat de gevonden regressiecoëfficiënten bij een significantieniveau van 0,05 verschillen van nul (a.w. blz. 67). Dit is door hen vertaald in een factor die de invloed van het verschil tussen één en twee toeritstroken op de capaciteit weergeeft (zie blz. 82).
Op turborotondes wordt het strookgebruik van het rechtdoorgaande verkeer op de hoofdtak niet gehinderd door strookwisselen op de rotonde. Dat betekent dat dit verkeer beide stroken goed gebruikt, met een accent op de linker strook (die route is iets korter). Op de zuidelijke aanvoertak van de rotonde Nieuwerkerk bijvoorbeeld is het gemiddeld aandeel per vijf-minutenperiode van de rechter toeritstrook: 47 ± 9 %. Alleen als veel verkeer linksaf slaat (zoals op de toerit Nieuwerkerk noord, waar tijdens het onderzoek een belangrijk deel van het verkeer een keerbeweging moest maken), is het aandeel op de rechter strook lager (gemiddeld

per vijf-minutenperiode: 38 ± 9 %). Maar ook daar is de belastingverdeling nog evenwichtiger dan in het Duitse onderzoek op concentrische tweestrooksrotondes is gevonden. Dit betekent dat de derde veronderstelling uit paragraaf 4.1.5 (blz. 73) wordt bevestigd.

In Figuur 4.5-2 zijn de uitkomsten voor de turborotonde vergeleken met formule (4.22), met n_e=1,14 en t_C=4,3 s/pae (rotondestroken niet onderscheiden) en t_F =2,5 s /pae (FGSV,2006), gebaseerd op Brilon en Bäumer (2004).
Duidelijk is, dat in vergelijking met de Duitse concentrische tweestrooksrotondes:

- de hoofdtak van een turborotonde een hogere capaciteit heeft bij een conflicterende rotonde-intensiteit $Q_R < 1500$ pae/h (en een overwegend rechtdoorgaande hoofdstroom); bij Q_R = 800 pae/h is de gemeten toeritintensiteit Q_E = ca. 1000 pae/h versus 834 pae/h in FGSV 2006 2/2;
- ook de zijtak van een turborotonde een hogere capaciteit heeft, afhankelijk van de hoeveelheid rechtsafslaand verkeer; zelfs bij een zeer geringe hoeveelheid rechtsafslaand verkeer (Nieuwerkerk west) is de hoeveelheid verwerkt verkeer niet lager dan wat in Duitsland is gevonden als gemiddelde capaciteit.

In Bijlage F.4.7 worden meer in detail de uitkomsten met die van de concentrische tweestrooksrotonde vergeleken.



Figuur 4.5-2 Vergelijking capaciteit totale toeritten turborotonde met Duitse concentrische tweestrooksrotondes

4.5.7 Effect van het elimineren van de invoegverstoring

Bij het vertalen van de resultaten van dit onderzoek in een capaciteitsmodel voor (turbo)rotondes, is nagegaan in hoeverre het van belang is rekening te houden met de verschillende invloedsfactoren. Eén daarvan is de invoegverstoring (zie paragraaf 4.2.8 en Bijlage F.1.4). De invloed van het al dan niet rekening houden met de invoegverstoring kan in

het gebruikte schattingsmodel worden nagegaan door voor t_C , t_{CU} en t_{Ci} een waarde in te vullen groter dan de som van t_F en t_M. In Tabel 4.5.2 is het resultaat van die schatting weergegeven.

Duidelijk is dat het elimineren van de invoegverstoring zoals die door Troutbeck en Kako (1999) is afgeleid, de kwaliteit van een capaciteitsmodel niet verslechtert, mits voor de kalibratie van een hiaatacceptatie-model ook van capaciteitsmetingen op stroomniveau gebruik wordt gemaakt.

Tabel 4.5.2 Effect van het achterwege laten van de invoegverstoring

	t_C rekening houdend met invoegver-storingsfactor z [s/pae]	t_C zonder invoegver-storings-factor [s/pae]	Kwadraatsom residuen rekening houdend met invoegverstorings-factor z met Std	Kwadraatsom residuen zonder invoegverstorings-factor met Std
Toerit enkelstrooksrotonde	3,20	3,28	330.595 Std = 71,3 pae/h	330.744 Std =71,3 pae/h
Linker toeritstrook hoofdtak turborotonde	3,91	3,92	201.484 Std = 57,9 pae/h	201.275 Std = 57,9 pae/h
Linker toeritstrook zijtak turborotonde	3,96	4,03	519.381 Std = 70,0 pae/h	519.532 Std = 70,0 pae/h

4.6 Conclusies

In Figuur 4.6-1 zijn voor de onderzochte rotondetoeritten drie samengestelde exponentiële capaciteitsfuncties voor een enkele (linker) rijstrook in beeld gebracht. Het betreft de capaciteitsformules voor:

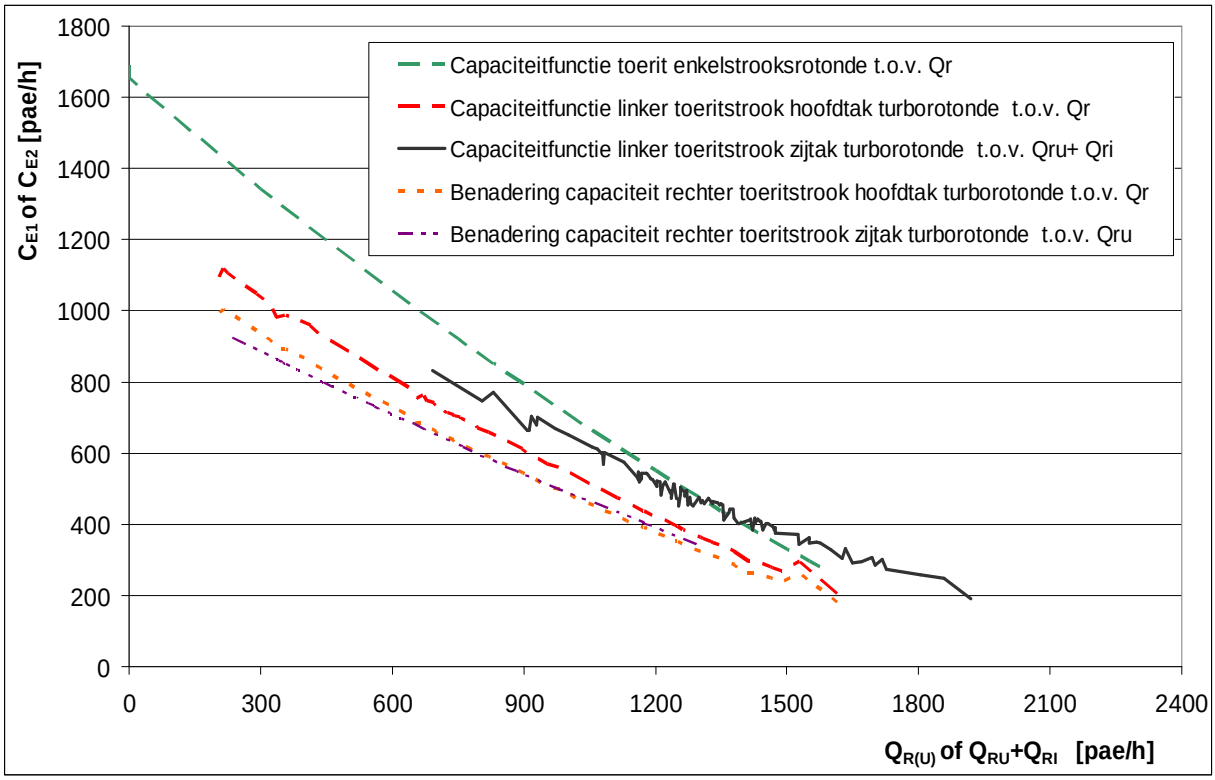
a) de toerit enkelstrooksrotonde (Tanner^{CS}, paragraaf 4.5.1) – de bovenste onderbroken lijn;
b) de linker toeritstrook naar een enkelstrooks rotondesegment (hoofdtak, Tanner^{CKHR} , paragraaf 4.5.2) – de middelste onderbroken rode lijn[152];
c) de linker toeritstrook naar een tweestrooks rotondesegment (zijtak, Fisk^{CKHR}, paragraaf 4.5.3) – de getrokken (discontinue[152]) lijn.

Voor twee rechter toeritstroken is in Figuur 4.6-1 een benadering van de capaciteit in beeld gebracht. Het betreft:

d) de hoofdtak van de turborotonde (paragraaf 4.5.5) –de bovenste gestippelde lijn;
e) de zijtak van de turborotonde (paragraaf 4.5.5) –de onderste gestippelde lijn.

[152] Bij elke waarde van de rotonde-intensiteit(en) Q_R of Q_{RU} in de grafiek behoort ook een waarde van het afslaande verkeer Q_S. Bij de enkelstrooksrotonde is daarvoor uitgegaan van een vaste verhouding. Bij de turborotondes is gebruik gemaakt van de waargenomen verhoudingen. Omdat die fluctueren, vertonen ook de grafieken van de toeritstrookcapaciteiten fluctuaties. De fluctuaties in de functie voor de capaciteit van de linker toeritstrook van de zijtak van de turborotonde, worden ook veroorzaakt door wisselende verdelingen van het verkeer over beide rotondestroken.

Uit de schattingsresultaten van de parameters voor de capaciteitsmodellen van een toerit(strook) naar een enkelstrooks rotondesegment, blijkt dat een (samengestelde) exponentiële capaciteitsformule de vorm van een lineaire functie benadert, ongeacht of het een enkelstrooksrotonde of hoofdtak van de turborotonde betreft. De toegevoegde waarde van een exponentiële functie ten opzichte van een lineaire functie is in deze gevallen dan ook niet groot (Figuur 4.6-1 en de figuren F.4-4 en F.4-7).



Figuur 4.6-1 Capaciteitsfuncties toeritstroken enkelstrooksrotonde en linker toeritstroken turborotonde met benadering voor de capaciteit rechter toeritstroken

Voor de capaciteit van een toeritstrook naar een tweestrooks rotondesegment schiet een lineaire functie tekort. Een samengestelde exponentiële functie, qua afleiding gebaseerd op de hiaatacceptatie-theorie en toegespitst op de gevallen waarin sprake is van meer dan één rotondestrook, biedt dan een goed uitgangspunt. Een belangrijk kenmerk daarvan is, dat op basis van assumptie 5 (paragraaf 4.2.5) het effect van de verdeling van het rotondeverkeer over de twee stroken is opgenomen. En hoewel assumptie 5 een lichte overschatting laat zien, blijkt uit de analyse van de onderzoeksdata wel het positieve, niet-lineaire, effect van de verdeling van het rotondeverkeer over twee rotondestroken voor de toeritcapaciteit. Hiermee worden eerdere resultaten uit simulatieberekeningen bevestigd: een meer evenwichtige verdeling verhoogt de capaciteit van de zijtak (veronderstelling 2, blz. 73). Daarbij moet wel in rekening worden gebracht, dat fluctuaties binnen een uurverdeling een minder evenwichtige verdeling oplevert, dan uurgegevens doen vermoeden.

Geconstateerd is, dat een één-op-één vertaling van de parameterwaarden uit hiaatwaarnemingen tot te hoge capaciteitswaarden leidt (zie Figuur F.4-13 en F.4-14). Dit

betekent, dat de werkelijkheid sterker afwijkt van de assumpties die ten grondslag liggen aan de hiaatacceptatie-modellen, dan bij de start van deze studie werd vermoed. Afwijkingen zijn geconstateerd ten aanzien van:

- assumptie 1 (consistentie in gedrag neemt af bij meer complexe situaties);
- assumptie 2 (bestuurders reageren mogelijk minder gelijk op meer complexe situaties[153]);
- assumptie 3 (hiaten $t > t_C$ zijn verschoven exponentieel verdeeld[154]);
- assumptie 4 (beïnvloeding van rotondeverkeer door invoegend verkeer[155]);
- assumptie 5 (hiaten op twee rotondestroken zijn ten opzichte van elkaar onafhankelijk verdeeld, zij het in beperkte mate).

Via het gebruik van parameterwaarden bepaald uit stroomwaarnemingen kan een voor de praktijk bruikbaar model worden afgeleid. In theoretisch opzicht is het betrekkelijk grote verschil tussen de resultaten uit hiaatmetingen en stroommetingen onbevredigend. Het ontwikkelen van een theoretisch beter alternatief voor modelschattingen op basis van hiaatgegevens behoort echter niet tot de doelstelling van deze studie.

De schattingsresultaten uit stroommetingen geven aanleiding om in capaciteitsmodellen onderscheid te maken naar de herkomst van het afslaand verkeer als het gaat om de invloed daarvan op de toeritcapaciteit. Nader onderzoek is nodig om na te gaan in hoeverre de invloed van afslaand verkeer afkomstig van de voorliggende tak, verschilt van die van het afslaand verkeer dat afkomstig is van het daarvoor gelegen rotondesegment.

Het gevonden positieve effect van de laatst genoemde groep afslaand verkeer hangt vermoedelijk samen met de interrumperende functie daarvan op een dominante hoofdstroom vanaf de voorliggende rotondetoerit. Dat vraagt nader uitgebreid rotondeonderzoek, waarin niet alleen het rotondeverkeer direct vóór en tegenover de betreffende tak wordt betrokken, maar ook dat ter plaatse van de voorliggende tak. Een dataverzameling waarin alle manoeuvres op de rotonde traceerbaar blijven, is voor een dergelijke studie noodzakelijk.

Bij lage rotonde-intensiteiten is de capaciteit van de linker toeritstrook van de hoofdtak van een turborotonde lager dan die van de toerit van een enkelstrooksrotonde. Bij hogere rotonde-intensiteiten neemt dat verschil af. Een punt van nader onderzoek is de vraag, of het rechthoekige begin van de binnenste rotondestrook voor de weggebruiker de beoordeling van de verkeerssituatie zodanig vereenvoudigt, dat een hogere oprijcapaciteit het gevolg is.

Ook is de capaciteit van de linker toeritstrook van de zijtak van een turborotonde bij lage rotonde-intensiteiten kleiner dan van de toerit naar een enkelstrooksrotonde. Maar bij grote

---

153 Zie voor de behandeling van deze beide assumpties subparagraaf ‘Consistentie en homogeniteit‘ op blz.99.

154 In Bijlage D.1.2 wordt hierop nader ingegaan. Overigens is ook de combinatie van een lage $t_{M\,stroom}$ en een hoge waarde van ψ (in tabel F.4.1) een indicatie voor de twijfelachtigheid van zowel assumptie 2 als assumptie 3.

155 De correctie via de invoegverstoringsfactor z blijft beperkt. Zie paragraaf 4.2.7, blz.89 en paragraaf 4.5.7, blz.108.

rotondestromen is de capaciteit van de linker toeritstrook van de zijtak van een turborotonde hoger dan bij een enkelstrooksrotonde, gegeven de geconstateerde – redelijk evenwichtige – verdeling van het verkeer over de rotondestroken.

De hoofdtak van een turborotonde heeft met een rechtdoorgaande hoofdstroom bij rotonde-intensiteiten $Q_R < 1500$ pae/h een hogere capaciteit dan een tweestrooks aanvoertak van een compacte concentrische tweestrooksrotonde (met enkelstrooks afvoertakken). De reden hiervan is, dat het verkeer beter over de beide toeritstroken is verdeeld.

De benutting van de capaciteit van een dubbele toerit op de zijtak van een turborotonde is sterk afhankelijk van de hoeveelheid rechtsafslaand verkeer. Een vergelijking met onderzoeksresultaten in Duitsland laat zien, dat zelfs bij weinig rechtsafslaand verkeer de capaciteit van de zijtak niet of nauwelijks onderdoet voor de gemiddelde waarden die in Duitsland zijn gevonden voor de compacte concentrische tweestrooksrotonde.

Ten slotte kan nog worden opgemerkt, dat de gemeten verschillen in waarden van het kritisch hiaat en de oprijvolgtijd op twee enkelstrooksrotondes die in diameter verschillen, doen vermoeden dat een hogere doorrijsnelheid tot een hogere waarde voor het kritisch hiaat en een lagere waarde van de oprijvolgtijd leidt.

5 Rotondes en pleinen met verkeerslichten

De moderne enkelstrooksrotonde biedt op een relatief klein oppervlak t.o.v. ongeregelde kruispunten meer capaciteit met een veiliger verkeersafwikkeling, zonder dat verkeerslichten nodig zijn. Voor verkeersstromen die extra capaciteit vragen is de turborotonde ontwikkeld. In dit hoofdstuk staat de vraag centraal of verkeerslichten in combinatie met rotondes en verkeerspleinen kunnen bijdragen aan een hogere capaciteit, eveneens onder de voorwaarde van een veilige verkeersafwikkeling.

Paragraaf 5.1 beschrijft de bijdrage van verkeerslichten aan de verbetering van de verkeersafwikkeling op deze relatief kleine rotondes. Speciale aandacht verdienen rotonde-doseerinstallaties (RDI's).

Op verkeerspleinen waar het toeritverkeer voorrang moet verlenen aan meer dan twee rijstroken, zijn verkeerslichten nodig voor het waarborgen van een veilige en effectieve verkeersafwikkeling[156]. In Nederland ging men tot voor kort uit van verkeerspleinen waarop de aan- en afvoertakken tangentieel aansluiten. Nadelen van een dergelijke vormgeving zijn de hoge snelheden en de relatief grote diameter die nodig is om voldoende opstelgelegenheid te bieden voor het verkeer dat driekwart rond moet gaan. Gebrek aan opstelruimte voor dit linksafslaand verkeer beperkt de mogelijkheid voor toepassing van een tweefaseregeling, die een betere verkeersafwikkeling biedt dan een vierfaseregeling (paragraaf 5.2).

Tegen deze achtergrond is een alternatieve pleinvorm ontwikkeld, met als doel om enerzijds lagere oprij- en doorrijsnelheden te bereiken en anderzijds een vergroting van de opstelruimte op het plein voor linksafslaande verkeer. Dit type verkeersplein wordt aangeduid met de naam 'turboplein' en kenmerkt zich door aanvoertakken die radiaal en afvoertakken die tangentieel aansluiten (paragraaf 5.3). De radiale aansluitvorm van de aanvoertakken vraagt om een

[156] De effectiviteit van een extra derde strook is aanzienlijk lager dan van een extra tweede strook. Zie Figuur 4.2-4.

goede geleiding van de verkeersdeelnemers. Alternatieve oplossingen daarvoor komen aan de orde in paragraaf 5.4.

Het turboplein is een oplossing voor situaties waar de hoeveelheid verkeer een groot aantal rijstroken noodzakelijk maakt. Dat grote aantal bemoeilijkt de rijtaak van de verkeersdeelnemer. In Paragraaf 5.5 wordt ingegaan op de hoge eisen die dit stelt aan de detaillering van zowel de markering als de bebording.

Een vergelijking van de verkeersafwikkeling op een turboplein (met een tweefaseregeling) en een standaard viertakskruispunt (met een vierfaseregeling) laat het voordeel van zo'n oplossing bij zware verkeersbelastingen zien (paragraaf 5.6).

5.1 Rotondes en verkeerslichten

5.1.1 Mogelijkheden verkeerslichten op (kleine) rotondes

Als een rotonde een kleine diameter heeft (buitendiameter tot ca. 70 m) kunnen zich op de rotonde zelf geen wachtrijen opstellen. De rotondesegmenten zijn dan te kort. Dan kunnen alleen de volgende verkeersregelingen worden toegepast:

- verkeerslichtenregeling met een poot-voor-poot regeling;
- rotonde-doseerinstallatie (RDI) op een aanvoertak, waarbij het verkeer wordt opgevangen op de aanvoertak.

5.1.2 Verkeerslichtenregeling

Een poot-voor-poot regeling kenmerkt zich door het feit, dat steeds slechts één tak tegelijk groen licht heeft. In deze studie wordt een black-box benadering toegepast: de optelsom van het verkeer dat vanaf de takken de rotonde kan oprijden is voldoende om de potenties van een verkeerslichtenregeling op een rotonde te verkennen. Hiervoor is geen beschrijving van de regeling in detail nodig, maar – uitgaande van een regeling die met de klok mee draait – kan volstaan worden met het bepalen van:

a) de mogelijkheid dat twee takken een overlap in de groenfase kunnen hebben;
b) de afrijcapaciteit.

Ad a) Een volledige verkeerslichtenregeling maakt het noodzakelijk om op de rotondesegmenten voor elke aansluitende tak ook verkeerslichten te plaatsen. Bij een poot-voor-poot regeling hebben die alleen tot doel een 'verdwaalde'[157] auto op te vangen, zodat die geen aanrijding veroorzaakt. De berekende ontruimingstijd van een dergelijke deelkruising bedraagt voor een enkelstrooksrotonde 0 seconde en voor de turborotonde 0,3 seconde (volgens berekeningsmethode CROW, 1996). Op een enkelstrooksrotonde met een diameter Ø 38 m bedraagt de gemiddelde afstand tussen een stopstreep op de aanvoertak en de volgende stopstreep op het rotondesegment (voor het volglicht) ca. 20 m. Op een turborotonde met een doorsnede Ø 50 m is deze afstand 25 m. Dit resulteert bij een

[157] Een auto die een U-turn maakt of zeer langzaam rijdt.

doorrijsnelheid van 10 m/s in een oprijtijd tot de volgende stopstreep van respectievelijk 3,4 en 3,9 seconde. Verminderd met de afrijtijd en een geeltijd van 3 seconde resulteert dat in een theoretische faseoverlap van respectievelijk 0,4 en 0,6 seconde. Deze benadering gaat er impliciet van uit, dat de oprijdende auto voor het volglicht afremt (en daarna met 2 i.p.v. met 1,5 m/s^2 weer versnelt). Realistischer is om ervan uit te gaan dat ter plaatse bekenden zullen doorrijden, omdat ze weten dat het licht op groen springt op het moment dat ze de stopstreep zijn gepasseerd. Dit kan benaderd worden door de 'ontruimingstijd' tussen het conflictpunt en de stopstreep op voorliggende[158] tak te berekenen. Deze bedraagt in beide gevallen 0 seconde. Dit betekent dat de voorliggende tak (bijvoorbeeld richting 5) groen kan krijgen op het moment dat het groen op de volgende tak (in dit voorbeeld richting 2) wordt beëindigd. Dan bestaat er geen faseoverlap[159].

Alleen wanneer de af te leggen afstand op de rotonde groter is dan waarvan hiervoor is uitgegaan (bijvoorbeeld door een grotere straal of bij een rotonde met drie takken) kan 'voorstartgroen' worden gegeven. In dat geval biedt een verkeersregeling met een kortere cyclustijd een hogere capaciteit, in tegenstelling tot wat normaal gebruikelijk is. Maar op een viertaksrotonde is een toename van de diameter van meer dan 10 m nodig, om een bruikbare faseoverlap te bereiken.

Ad b). De oprijvolgtijd vanaf een tak van een enkelstrooksrotonde bedraagt 2,13 s/pae, terwijl die op een aansluittak van een turborotonde varieert tussen de 2,25 en 2,8 s/pae (zie hoofdstuk 4). Wanneer bij het oprijden van een rotonde groen licht wordt getoond, is het aannemelijk, dat de volgtijden kleiner zijn maar toch groter dan op een rijstrook voor rechtdoor, aangezien bij het oprijden van de rotonde de stuurtaak de nodige concentratie vraagt. Omdat hiervan geen nadere onderzoeksgegevens beschikbaar zijn, wordt uitgegaan van een afrijcapaciteit van 1700 à 1750 pae/h.

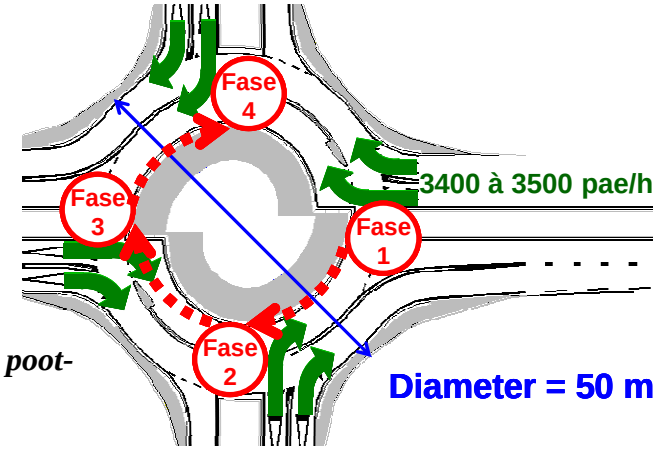
Combinatie van a) en b) leidt tot een capaciteit van 1750 pae/h voor een enkelstrooksrotonde die voorzien is van een verkeerslichtenregeling. Dat is veel lager dan voor een enkelstrooksrotonde zonder een verkeerslichteninstallatie (2000 à 2500 pae/h[160]) wordt gehanteerd. Dit betekent dat bij plaatsing van verkeerslichten de capaciteit van een enkelstrooksrotonde zal afnemen.

Ook op een compacte tweestrooksrotonde of turborotonde is zonder een aanzienlijke vergroting van de diameter alleen een poot-voor-poot regeling mogelijk. Het principe daarvan is weergegeven in Figuur 5.1-1. Voor twee aanvoerstroken naast elkaar kan van een afrijcapaciteit van 2 x1700 à 1750 = 3400 à 3500 pae/h worden uitgegaan. Dit komt overeen met de belasting die een ongeregelde turborotonde bij bepaalde belastingpatronen kan bieden.

[158] De begrippen 'voorliggend' en 'volgend' worden geduid vanuit de rijrichting. Dit is dus tegengesteld aan de richtingnummering: de tak met de richtingnummers 4, 5 en 6 ligt voor de tak met de richtingen 1, 2 en 3.

[159] M.a.w. faseoverlap d.m.v. voorstartgroen leidt óf tot onveiligheid (door ter plaatse bekenden) óf tot grotere volgtijden bij het oprijden door stagnatie bij het volglicht (door onbekenden).

[160] In *Eenheid in rotondes* (CROW, 1998) wordt bijvoorbeeld als vuistregel voor een enkelstrooksrotonde een intensiteit van 20.000 – 25.000 mvt/etmaal genoemd.



Figuur 5.1-1 Maatgevende capaciteit geregelde turborotonde met poot-voor-poot regeling

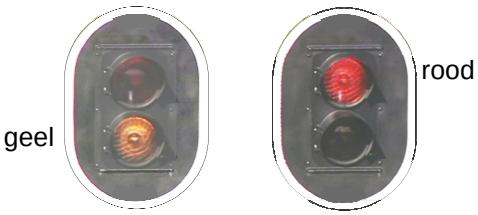
Overigens geldt dit niet zonder meer voor alle typen turborotondes. Zeker in het geval van de – drietaks – sterrotonde[161]is het zowel mogelijk om de afrijcapaciteit van alle toevoerstroken optimaal te benutten, alsook gebruik te maken van groenlichtoverlap tussen de twee aansluitarmen die in elkaars verlengde liggen. Bij een verkeersafhankelijke regeling is het dan wel nodig, dat de hiaatmeting ten minste op één tak op een grotere afstand plaatsvindt, om tijdig het groene licht op de voorliggende tak te kunnen starten. Dit vraagt om een nadere detaillering die in het kader van deze studie buiten beschouwing blijft.

5.1.3 Rotonde-doseerlichten

Functie rotonde-doseerinstallatie (RDI)

De werking van een rotonde-doseerlicht is op een geheel ander principe gebaseerd dan een toeritdoseerinstallatie (afgekort tot TDI). Een TDI beoogt de hiaten tussen de voertuigen te vergroten (ont-clustering van het toeritverkeer), zodat voorkomen wordt dat het invoegen van de voertuigen die voorrang moeten verlenen tot terugstuwing op de autosnelweg leidt – de weg waarop het verkeer voorrang heeft. Een rotonde-doseerinstallatie (af te korten tot RDI) beoogt het tegendeel: het verkeer op de rijbaan die voorrang heeft – de rotonde – wordt geclusterd. Dit wordt bereikt via onderbreking van de verkeersstroom op een dominante aanvoertak. Met als gevolg een groepering van zowel de voertuigen als de hiaten op de rotonde. Daarom zijn ze ook wel als opvanglicht aangeduid (Fortuijn, 2003a). Door deze clustering van hiaten is het verkeer vanaf de zijtak in staat op te rijden. Dit betekent dat de eigenlijke conflictafhandeling geschiedt op basis van de beoordeling door de verkeersdeel-nemers zelf. Verder is een belangrijk verschil met een volledige verkeerslichtenregeling, dat in principe het verkeer op één tak tegelijk wordt opgevangen, terwijl het verkeer vanaf de andere takken op de ongeregelde manier de rotonde op kunnen blijven oprijden. Omdat ze incidenteel in werking treden, worden ze uitgevoerd als tweekleurige verkeerslichten. Die kennen alleen een rood en een geel licht; het groene licht ontbreekt. Als op de aanvoertak geen snelheidslimiet van 50 km/h geldt, dient het gele licht volgens de Regeling verkeerslichten (DGP, 2001) eerst te knipperen (3 seconden). Omdat dit onnodig verlies kan opleveren, is het zinvol om buiten de bebouwde kom op een dergelijke naderingstak een snelheidslimiet in te stellen. De geelfase kan dan 3 seconde zijn.

[161] Zie paragraaf 3.4.



Figuur 5.1-2 Tweekleurige verkeerslantaarn

Plaats tweekleurige lantaarn

De afstand tussen opvanglicht en rotonde is van invloed op de tijd tussen de aanvraag vanaf de zijtak en het onderbreken van de rotondestroom tegenover de betreffende zijtak. Vanuit een oogpunt van verkeersafwikkeling dient de afstand tussen opvanglicht en rotonde dan ook zo klein mogelijk te zijn. Verkeersveiligheidsoverwegingen bepalen de ondergrens van die afstand. Dan doen zich twee mogelijkheden voor. Als er een fiets- en/of voetgangersoversteek uit de voorrang aanwezig is, dient de afstand tot de fietsoversteek zodanig te zijn, dat die verkeersdeelnemers hun oversteek beëindigd kunnen hebben voordat een optrekkende auto bij hen is. Daarvoor is een afstand tussen de 30 à 45 m nodig, ervan uitgaande dat een voetganger weliswaar langzamer is dan een fietser, maar eerder ziet wanneer een auto gaat rijden, terwijl een automobilist de voetganger ook langer waarneemt. Als er geen oversteek uit de voorrang voor langzaam verkeer is, is het reactievermogen van de autobestuurder maatgevend. Na het doven van het rode licht beslist de bestuurder om op te rijden. Het is van belang dat de bestuurder dan niet direct daarop geconfronteerd wordt met een situatie waarin voorrang moet worden verleend. Uitgaande van een oriëntatie- en reactietijd van 5 seconde (Staplin, L., K. Lococo, & S. Byington, 1998) en een optrekversnelling van 1,5 m/s^2 wordt in eerste instantie een afstand van 30 à 45 m gekozen.

Plaats en functie detectoren

Onderscheiden worden:

- de aanvraagdetectie op de zijtak, d.w.z. de aansluitende tak waarvan de toeritcapaciteit laag is door dominante hoofdstro(o)m(en);
- de uitsteldetectie op de hoofdtak, d.w.z. de aansluitende tak waarvan de dominante hoofdstroom afkomstig is.

De aanvraagdetectie stelt het rode opvanglicht op de hoofdtak in werking bij filevorming[162] op de zijtak, terwijl de uitsteldetectie die inwerkingstelling uitstelt zolang de filevorming op de hoofdtak een bepaalde grens overschrijdt.

Als criterium voor beide is de wachttijd op de betreffende aansluittak bepalend. Nu is de relatie tussen wachttijd en wachtrijlengte afhankelijk van de afrijcapaciteit. Als bij benadering uitgegaan wordt van het M/M/1 wachtsysteem[163], is dit uit te drukken in een eenvoudige relatie (Fortuijn en De Leeuw, 2009e):

[162] De techniek om filevorming vast te stellen valt buiten de scope van dit proefschrift. Voor de eenvoud wordt uitgegaan van een bezetlus die een afvaltijd nodig heeft van 2 seconde.

[163] Het M/M/1 wachtsysteem veronderstelt een exponentiële verdeling van de volgtijden in zowel het aanvoer- als afvoerproces. De Cowan M1-verdeling gaat voor het afvoerproces van dezelfde aanname uit. Het is de vraag in hoeverre een benadering via een verdeling volgens het M3-model van Cowan (zie

$$d_E = \frac{3600}{C_E - Q_E} \qquad [s/pae] \tag{5.1}$$

$$N_E = \frac{C_E}{C_E - Q_E} \qquad [\#] \tag{5.2}$$

Uit (5.1) en (5.2) volgt:

$$N_E = \frac{C_E \cdot d_E}{3600} \tag{5.3}$$

En voor de lengte van de wachtrij (wanneer L_v = 6 m/pae):

$$L_E = \frac{L_v \cdot C_E \cdot d_E}{3600} = \frac{C_E \cdot d_E}{600} \ [m] \tag{5.4}$$

Hierin is:

C_E : capaciteit toeritstrook bij de gegeven rotondebelasting [pae/h]
d_E : gemiddelde wachttijd op de toeritstrook naar de rotonde [s/pae]
L_v : gemiddelde afstand tussen voorkant-voorkant personenauto's in een wachtrij [m/pae]
L_E : gemiddelde lengte van de wachtrij op de rotondetoeritstrook [m]
N_E : gemiddeld aantal voertuigen in de wachtrij op de rotondetoeritstrook, gegeven de aanwezigheid van een wachtrij [#]
Q_E : intensiteit toeritstrook [pae/h]

Als kwaliteitscriterium kan bijvoorbeeld een gemiddelde wachttijd van $d \leq 50$ [s/pae] worden gehanteerd. De wachtrijlengte en de wachttijd vertonen een spreiding. Voor de standaardafwijking van de wachtrijlengte geldt:

$$Std[N_E] = \frac{\sqrt{\rho}}{(1-\rho)} \tag{5.5}$$

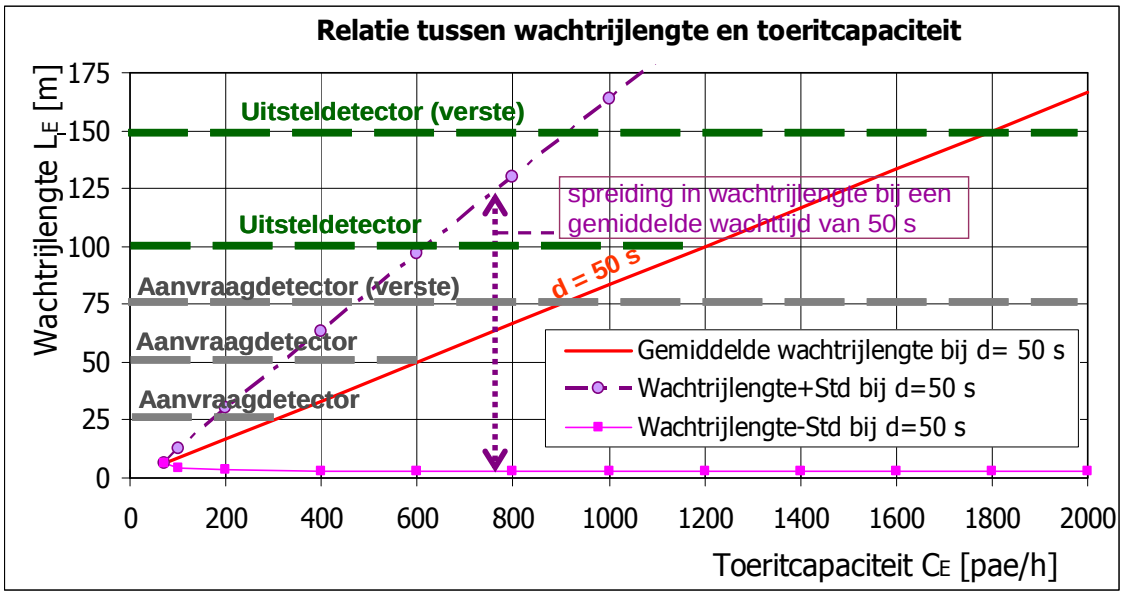
waarbij voor de verzadigingsgraad ρ geldt: $\rho = Q_E/C_E$. Gebruikmakend van vergelijking (5.3) geldt:

$$Std[N_E] = \frac{d_E \cdot C_E}{3600} \cdot \sqrt{1 - \frac{3600}{d_E \cdot C_E}} \tag{5.6}$$

De waarden voor de wachtrijlengten die behoren bij de gemiddelde wachttijd van 50 s/pae zijn weergegeven in Figuur 5.1-3. Uit het stelsel vergelijkingen is duidelijk, dat de gemiddelde wachtrijlengte lineair gerelateerd is aan de toeritcapaciteit. Maar uit de bijbehorende spreiding volgt, dat onafhankelijk van de toeritcapaciteit de ondergrens in de spreiding van de wachtrijlengte een enkele auto bedraagt. Welke detectorconfiguratie men ook kiest, individuele uitschieters in wachttijd zijn niet af te vangen.

Bijlage D.1.2) een verbeterde benadering oplevert, ervan uitgaande dat de afrijcapaciteit op een juiste wijze is bepaald. Vermoedelijk is een meer verfijnde aanpak nodig voor het bereiken van een wezenlijk betere benadering van de werkelijkheid. Ook wordt ervan uitgegaan, dat zowel de aanvoer als de filevorming onbegrensd doorgaan. In werkelijkheid komt dat niet voor. Deze benadering is dan ook alleen toegestaan voor de analyse van onverzadigde verkeerssituaties, waarin wachttijden boven de 5 minuten uitzondering zijn. De formules zijn ontleend aan (Sklenar, J, *The M/M/1 Queuing System,* website).

Wel is uit Figuur 5.1-3 duidelijk dat niet uitgegaan kan worden van één bepaalde detectorafstand, maar dat een verder ontwikkeld detectiesysteem noodzakelijk is om optimale resultaten met een opvanglicht te bereiken. Een mogelijkheid is een combinatie van een tellus bij de rotondetoerit met drie filelussen. Afhankelijk van het aantal auto's dat gedurende de laatste 100 seconden op de tellus is geteld, leidt een continue bezetting van een bepaalde bezetlus al dan niet tot een file-ingreep. De kleinste en de grootste afstand van de bezetlus tot de rotonde wordt bepaald door de variatie in de te verwachten (of gemeten) toeritcapaciteit op de betreffende tak. De bezetlussen die het dichtst bij de rotonde liggen hebben pas een detectie-ingreep tot gevolg beneden de ingestelde intensiteitwaarde die de tellus meet. De werking van de bezetlus die het verst van de rotonde af ligt, wordt niet begrensd.



Figuur 5.1-3 Detectoringreep bij wachtrijlengte gerelateerd aan toeritcapaciteit

Duur van de roodtijd

Bij een regulier verkeerslicht wordt de duur van de roodfase bepaald door zowel verkeersafwikkelingaspecten als de verkeersveiligheid (ontruimingstijden). Bij een opvanglicht speelt het verkeersveiligheidsaspect een rol bij de plaats van het opvanglicht. Voor de duur van de roodfase is alleen het verkeersafwikkelingaspect van belang: de optimale benutting van het kruisingsvlak tegenover de tak vormt samen met de begrenzing van de wachttijden het bepalende criterium.

Voor het bepalen van de optimale duur van de roodfase kunnen verschillende benaderingen worden toegepast. De eenvoudigste is om uit te gaan van een vaste roodtijd. Deze is afhankelijk van de afstand van de aanvraagdetector tot de rotonde (L_{AD}). De afstand van voorkant-voorkant stilstaande personenauto's (L_v = 6 m) bepaalt het aantal auto's in de wachtrij op het moment dat de aanvraagdetector wordt geactiveerd. De oprijvolgtijd van de linker toeritstrook van de zijtak (t_F=2,25 s/pae, paragraaf 4.5.3) is dan bepalend voor de tijd die het kost om de wachtrij tussen aanvraagdetector en rotonde weg te werken, ervan uitgaande dat de verstoringen door linksafslaand verkeer vanaf de tegenovergelegen tak te verwaarlozen zijn. De benodigde roodtijd is echter kleiner, omdat de laatste auto die nog door

het gele licht rijdt sneller bij het conflictvlak is dan de eerste auto na het doven van het rode licht. Uitgaande van een rotonde-doorrijsnelheid v_r=10 m/s en een optrekversnelling a =1,5 m/s^2 bedraagt dat verschil t=v_r/a=10/1,5 = 6,7 seconde. Wel moet daar nog de tijd voor het benodigde hiaat in het rotondeverkeer (t_C=4 s) worden bijgeteld. Afhankelijk van de ligging van de aanvraagdetector worden dan de instellingen verkregen uit Tabel 5.1.1.

Tabel 5.1.1 Vaste roodtijden afhankelijk van positie aanvraagdetector

Formule vaste roodtijd $RT_{vast,} = (L_{AD}/L_V)\cdot t_F + t_C - v_r/a_O$	
Afstand aanvraagdetector tot rotonde (L_{AD})	Vaste roodtijd
25 m	9,0 s
50 m	18,4 s
75 m	27,8 s

Wanneer wel rekening moet worden gehouden met verstoringen door linksafslaand verkeer vanaf de tegenover gelegen zijtak, ligt het voor de hand om gebruik te maken van de afmelding van de aanvraaglus. De tijd die nodig is tussen het einde van het detectiesignaal van de bezetlus en het beëindigen van de roodfase wordt aangeduid door OT (overgangstijd). Hiervoor geldt:

$$OT = T_{ZDS} - T_A - T_{HLS} + t_C \quad (5.7)$$

$$T_{ZDS} = (L_{AD}/Lv)\cdot(t_F - t_B) \quad (5.8)$$

$$T_{HLS} = (v_r / a_{optrekken}) + \{L_L - v^2_r/(2\cdot a_{optrekken})\}/v_r + t_R \quad (5.9)$$

indien $\{L_L - v_r/(2\cdot a_{optrekken})\} > 0$, anders $T_{HLS} = \sqrt{(L_L/a)} + t_R$

Hierin is:

OT: overgangstijd, d.w.z. de tijd tussen het moment waarop de auto op de aanvraagdetector in beweging komt en het moment waarop het rode opvanglicht moet doven

L_{AD}: afstand tussen rotonde en de betreffende aanvraaglus

L_L: afstand tussen de stopstreep voor het rotonde-doseerlicht en het conflictvlak op de rotonde tegenover de (volgende) zijtak waarvoor het rotonde-doseerlicht in werking is gesteld

L_v: afstand voorkant-voorkant personenauto's in stilstand = 6 m (praktijkmaat)

T_{ZDS}: tijd tussen het moment waarop de auto op de aanvraagdetector in beweging komt en het moment waarop deze de rotonde bereikt

T_A: detectorafvaltijd, d.w.z. de tijd tussen het moment waarop de auto de detector verlaat en het moment waarop de detector het sein geeft 'filevrij'
T_A =2 s kan als minimum hiervoor worden aangehouden

T_{HLS}: tijd tussen moment waarop het rode licht dooft en het moment waarop de eerste auto vanaf de hoofdtak het conflictvlak tegenover de zijweg bereikt

t_C : kritisch hiaat = 4 s

t_F: oprijvolgtijd = 2,25 s

t_B: tijd tussen de momenten waarop auto's in een wachtrij achtereenvolgens in beweging komen; $t_B = 0{,}5\cdot t_F$ à 1 s/pae (praktijkmaat)

t_R: reactietijd tussen doven opvanglicht en start rijden automobilist

v_r: rotonde-doorrijsnelheid = 10 m/s.

Uit Tabel 5.1.2 blijkt, dat wanneer gebruik wordt gemaakt van de afmeldinformatie van een aanvraagdetector op 25 m afstand van de rotonde, het niet mogelijk is om de overgangstijd te

optimaliseren. Altijd blijft er sprake van een verlies van 3 à 4,5 s, afhankelijk van de plaats van het opvanglicht. Een alternatief is om in dat geval een vaste roodtijd te hanteren uit Tabel 5.1.1.

Tabel 5.1.2 Berekende waarden overgangstijd tussen afmelding aanvraagdetector en doven rode licht

Formule: $OT= T_{ZDS} - T_A - T_{HLS} + t_C$		
Afstand aanvraagdetector tot rotonde	Afstand opvanglicht tot rotonde	
	30 m	45 m
	OT= tijd tussen detector-afmelding en doven opvanglicht	
25 m	-3,1 s	-4,6 s
50 m	1,6 s	0,1 s
75 m	6,3 s	4,8 s

Bij afstanden van 50 m en groter kan beter van de afmeldinformatie uit Tabel 5.1.2 gebruik worden gemaakt, omdat de roodtijd dan beter rekening houdt met de tijd die auto's vanaf de zijtak daadwerkelijk nodig hebben om op te rijden Wel is het van belang om de roodtijd dan daarenboven te begrenzen op bijvoorbeeld 30 à 40 seconde, afhankelijk van de detectormeetwaarden op de hoofdtak.

Op een overeenkomstige wijze kan de tijd worden bepaald waarmee een aanvraag moet worden uitgesteld, nadat de uitsteldetectie op de hoofdtak in werking is getreden. Dan speelt de gemeten afvoercapaciteit van de hoofdtak een beslissende rol.
Door middel van microsimulaties kunnen de in te stellen vertragingswaarden en toe te passen begrenzingen op een specifieke situatie nader afgestemd worden.

Rotonde-doseerlichten op enkelstrooks toeritten

Op grond van theoretische overwegingen is het niet te verwachten dat een opvanglicht de capaciteit van een enkelstrooksrotonde substantieel zal vergroten. Het doel van de clustering is, dat er in die periode tegenover de tak met een lange wachtrij praktisch geen rotondeverkeer is, zodat de voertuigen vanaf die tak kunnen oprijden. Maar zoals Tabel 5.1.3 laat zien, worden daarmee perioden gecreëerd, waarin de som van de rotonde-intensiteit en de toeritcapaciteit lager is dan wanneer er meer rotondeverkeer is (gebaseerd op capaciteitsmetingen rotonde Schipluiden). Kortstondige clusteringen (die in het model van Troutbeck de capaciteit verhogen) blijven in Tabel 5.1.3 buiten beschouwing. Daarom is het niet uitgesloten dat een RDI die heel kort rood licht heeft, dit negatieve beeld wat nuanceert.

Tabel 5.1.3 Verloop van de som van de rotonde-intensiteit en toeritcapaciteit enkelstrooksrotonde (zonder doseerlicht)

Intensiteit Q_R op een segment van een enkelstrooksrotonde	100	500	1000
Gemeten C_E capaciteit op de toerit	1550	1160	740
Som $Q_R + C_E$ [pae/h]	1650	1670	1740

Ondanks een nauwelijks te verwachten capaciteitswinst worden RDI's soms toch ook op enkelstrooksrotondes toegepast. Figuur 5.1-4 geeft daarvan een voorbeeld. Het belang daarvan is een herverdeling van wachttijden. Door een dominante verkeersstroom kunnen soms extreme wachttijden op de volgende tak ontstaan. Zonder dat de capaciteit toeneemt,

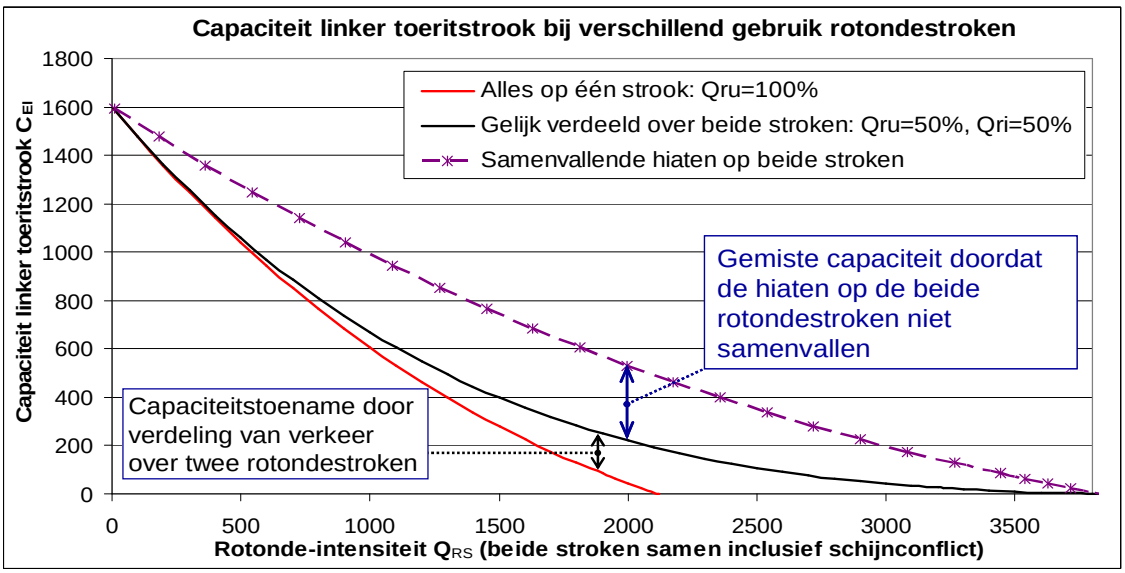
kan de herverdeling van wachttijden dan tot gevolg hebben, dat de gemiddelde wachttijd op de benadeelde tak onder de grens van 50 seconden komt, terwijl die op de dominante tak, voorzien van het tweekleurige licht, daar niet boven komt.



Figuur 5.1-4 Rotonde-doseerlicht aansluiting Hoogerheide / Woensdrecht van de A58 *(rond het jaar 2000 geïnstalleerd; later vervangen door een turborotonde)*

Rotonde-doseerlichten op tweestrooks toeritten

Op theoretische gronden mag verwacht worden, dat een opvanglicht op een tweestrooks toerit waarvan de beide stroken op de rotonde tot voorbij de volgende tak worden vervolgd, niet alleen een betere verdeling van de wachttijden kan bewerkstellingen, maar ook de capaciteit van de rotonde kan verhogen. Immers, om vanaf een toerit de binnenste rotondestrook op te rijden, is een hiaat in zowel de buitenste als de binnenste rotondestrook nodig. Wanneer het rotondeverkeer wordt geclusterd, worden de hiaten in beide stromen gelijktijdig geforceerd. Dat theoretische effect is in beeld gebracht in Figuur 5.1-5.[164]



Figuur 5.1-5 Effect van hiaatverdelingen op twee rotondestroken

[164] Hierin is de curve voor 'Samenvallende hiaten op beide stroken' verkregen door de waarden van de horizontale as van de curve voor 'Alles op één strook' te vermenigvuldigen met een factor 1,8. Theoretisch is deze factor gelijk aan 2, maar die waarde zal in de praktijk nooit haalbaar zijn. Daarom is gekozen voor de verhouding tussen de waarden waarop de curve 'Gelijk verdeeld over de rotondestroken' en de curve 'Alles op één strook' de x-as snijden.

5.1.4 Onderzochte rotonde-doseerinstallaties

Resultaat van een simulatie onder optimale condities

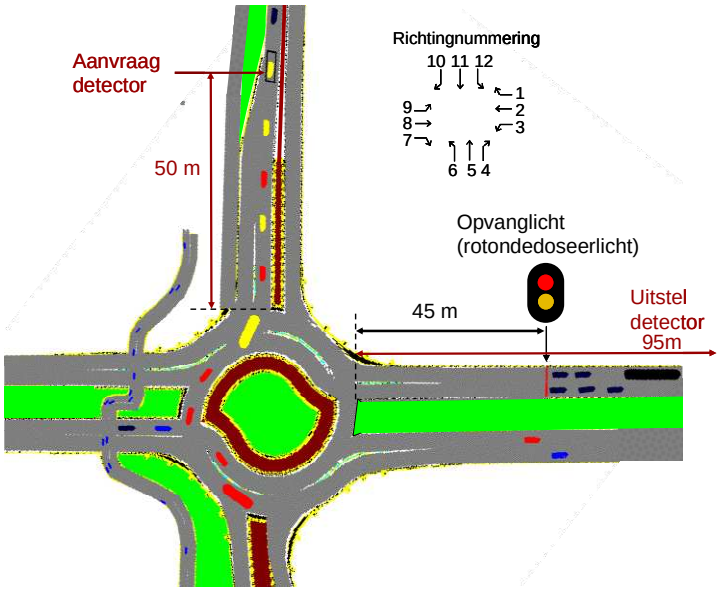
De eerste verkenningen van een RDI zijn in 2003 uitgevoerd door A.M. de Leeuw (Fortuijn, 2003a). Het opvanglicht op de hoofdtak is op 45 m voor de rotonde geplaatst met een vaste roodtijd van 20 s en de aanvraagdetector op de zijtak 50 m voor de rotonde. Minimaal dooft het rode licht daarna dan 20 s, tenzij de uitsteldetector op 95 m bezet is. De begrenzing van de uitsteltijd van de detector op de hoofdtak is niet onderzocht: voor de gebruikte aanvoerintensiteiten was geen begrenzing nodig. De gebruikte configuratie is weergegeven in Figuur 5.1-6.

Gebruik is gemaakt van het simulatietool Vissim. Uitgegaan is van een onevenwichtig belastingpatroon (zie Tabel 5.1.4). De verkeersbelastingen op de richtingen 1 en 2 zijn ingevoerd (de verschillen in deze tabel zijn een gevolg van het random proces dat in Vissim wordt gehanteerd). De belastingen op de richtingen 11 en 12 zijn zodanig zwaar, dat deze met een RDI met aanvaardbare wachttijden verwerkt konden worden. Zonder RDI trad bij deze invoer op deze zijtak continu file op bij een maximum capaciteit van 476 pae/h .

Tabel 5.1.4 Invoer en resultaten simulatie opvanglicht Hogendorpweg

Conflictbelastingen ter hoogte van een zijtak op een turborotonde	Turborotonde **zonder** opvanglicht	Turborotonde **met** opvanglicht
Intensiteit binnenste rotondestrook (gedeelte ri.2)	727 pae/h	752 pae/h
Intensiteit buitenste rotondestrook (gedeelte ri.2)	532 pae/h	536 pae/h
Intensiteit afslaande stroom naar dezelfde tak (ri.1)	360 pae/h	436 pae/h
Intensiteit dwarsverkeer op de rotonde (ri. 5+ 6+ 9)	0 pae/h	0 pae/h
Capaciteit linker rijstrook oostelijke zijtak (ri. 11+12)	476 pae/h	884 pae/h

Uit Tabel 5.1.4 blijkt, dat bij een belasting van de hoofdtak rond 1280 pae/h (1360 pae/h inclusief schijnconflict van richting 1) met een RDI de capaciteit van de zijweg van 476 met 86 % toeneemt tot 884 pae/h. Dit stemt overeen met de grafiek in Figuur 5.1-5.



Figuur 5.1-6 Voorbeeld situering van opvanglichten (RDI) op een tweestrooks aanvoertak van een turborotonde

Duidelijk is dat bij deze invoer de hoofdtak niet minder verkeer verwerkte. Dit betekent dat de totale verkeersprestatie van het betreffende conflictvlak (bestaande uit twee rotondestroken en één toeritstrook) van 1735 pae/h met 25% toeneemt tot 2172 pae/h.

Effecten van RDI's onder niet-optimale condities

In het gebruikte belastingpatroon van Tabel 5.1.4 is de invloed van andere conflicterende verkeersstromen buiten beschouwing gelaten. Verwacht mag worden dat vooral het rotondeverkeer dat de zijtak kruist terwijl het rotonde-doseerlicht in werking is (richting 6), de effectiviteit van het doseerlicht zal verkleinen. Ook zal het rotondeverkeer dat de hoofdstroom kruist (richting 5, 6 en 9) als het rotonde-doseerlicht gedoofd is, van invloed zijn op het uiteindelijke effect. Toch laten onderzoeken met uiteenlopende belastingpatronen positieve effecten van een rotonde-doseerlicht zien. Akçelik (2008) rapporteert afgenomen filelengten. Granneman (2011) heeft simulaties uitgevoerd met belastingpatronen waarin de hoeveelheid verkeer op de tak tegenover de zwaarst belaste hoofdtak 90 % bedraagt, waarvan 60 % rechtdoor gaat en 20 % respectievelijk rechtsaf en linksaf slaat. Beide zijrichtingen zijn even zwaar belast, waarvan 33 % respectievelijk rechtsaf en linksaf slaat. Bij verschillende verhoudingen tussen de hoofdtakken en de zijtakken zijn de belastingen steeds opgevoerd totdat de grens van een gemiddelde wachttijd van 50 seconde werd bereikt. Een RDI bewerkstelligde bij diezelfde belastingen een verlaging van de wachttijden, variërend van 15 tot 55 %. Maar ook konden de belastingen in alle gevallen verder worden opgehoogd: alle takken samen met 5 à 10 % en de zijtakken met 15% à 50 %. De theoretische winst uit Figuur 5.1-5 en Tabel 5.1.4 blijkt voldoende groot, om in situaties met minder optimale condities toch nog tot een positief resultaat te leiden. Opmerkelijk is, dat in sommige gevallen ook de verliestijd op de tak met het doseerlicht afneemt. Dit komt doordat een cluster voertuigen vanaf de aanvragende zijtak even de toevoer blokkeert van de twee volgende aanvoertakken. Dat zijn namelijk de takken, die weer op hun beurt normaal (zonder die blokkade) de wachttijden op de betreffende hoofdtak veroorzaken. Die korte blokkade zorgt er dan voor dat de wachttijd vanaf de hoofdtak na het rode licht extreem kort is, waardoor ook op die tak uiteindelijk tijdwinst optreedt.

5.2 Traditioneel verkeersplein met verkeerslichten

5.2.1 Kenmerken traditioneel verkeersplein

Het traditionele verkeersplein met verkeerslichten[165] kenmerkt zich door:

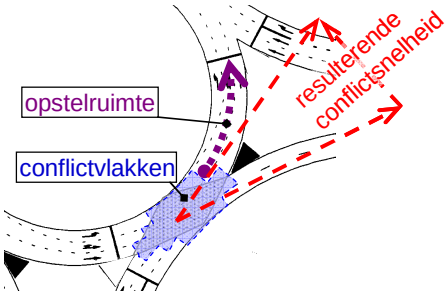
- takken die zowel in de aanvoer- als in de afvoerrichting tangentieel aansluiten;
- een diameter die veelal groot is;
- een belijning die al wel spiraalvormig kan zijn, maar zonder een consequente uitsplitsing naar rijrichting.

Het tangentieel aansluiten van de takken op een verkeersplein met verkeerslichten vloeide voort uit het feit, dat oorspronkelijk de verkeersafwikkeling gebaseerd was op het weven van de verkeersstromen op het plein. Later werden deze verkeerspleinen dan van verkeerslichten

[165] In vakkringen is het gebruikelijk niet zozeer over de verkeerslichten (in feite de signaalgevers) te spreken, maar over de verkeersregelinstallatie, afgekort tot VRI.

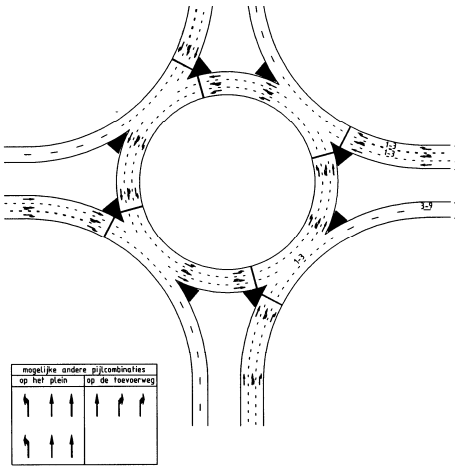
voorzien. Daarvoor was het nodig dat de takken tangentieel op het plein aansloten. Op het moment dat deze pleinen van verkeerslichten werden voorzien, verviel die reden. Desondanks heeft de tangentiële aansluitvorm voor een plein dat voorzien is van verkeerslichten, zijn functionele kant. Positief is, dat deze vorm afstand creëert tussen de afvoertak en de aanvoertak. Die is noodzakelijk om opstelgelegenheid te bieden voor linksafslaand verkeer, die op zijn beurt nodig is om een tweefaseregeling (zie Bijlage G.3.2) te kunnen toepassen. Positief is ook, dat de hoek tussen de conflicterende partijen klein is, wat de relatieve conflictsnelheid verkleint (bij voertuigen die de bochten afsnijden is de resulterende conflictsnelheid ca. 60 % van de voertuigsnelheid).

Maar er zijn ook negatieve aspecten. Nadeel van een tangentieel aansluitende aanvoertak is, dat de snelheden hoog kunnen zijn, waardoor het voordeel van een relatief kleine conflicthoek teniet wordt gedaan. Een ander nadeel van het tangentieel aansluiten van de aanvoertak is, dat de conflictvlakken door de kleine hoek tussen de rotonde en de aansluitende takken groot zijn in vergelijking met de resterende opstelruimte. Om voldoende opstelgelegenheid op het plein te verkrijgen werden de traditionele verkeerspleinen met verkeerslichten veelal met een grote diameter ontworpen. Een buitendiameter van 125 m is geen uitzondering. Ook komen maten van 200 m voor. Daardoor is het ruimtebeslag van zo'n verkeersplein groot.

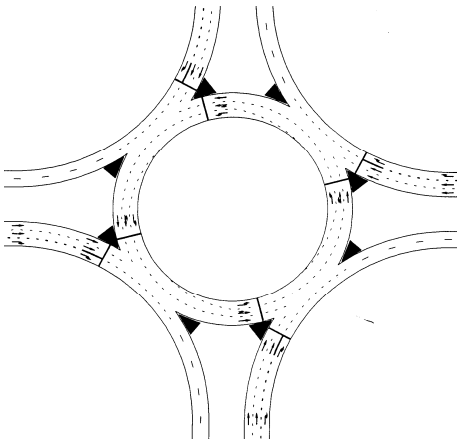


Figuur 5.2-1 Hoek tussen naderingsrichtingen en conflictvlak op een conventioneel verkeersplein

Aanvankelijk waren verkeerspleinen voorzien van een concentrische belijning (V&W, 1991). Zie Figuur 5.2-2. Voor de pijlmarkering werd niet het gehele plein als basis genomen, maar

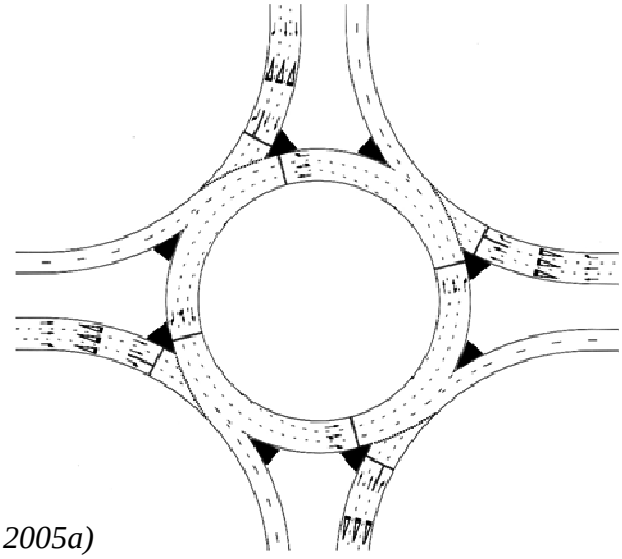


Figuur 5.2-2 Verkeersplein met conventionele (concentrische) markering volgens Richtlijn bebakening en markering 1991
(RBM-1991, V&W 1991)



Figuur 5.2-3 Verkeersplein met spiraalbelijning volgens Richtlijn bebakening en markering 1991
(RBM-1991, V&W 1991)

steeds de eerstvolgende deelkruising. Volgens deze markering kan de middelste rijstrook op de toerit voor zowel rechtsaf, rechtdoor als linksaf worden gebruikt. De linker toeritstrook kan voor zowel linksaf als rechtdoor worden gebruikt, terwijl even verderop deze alleen voor linksaf verkeer bedoeld is. Het gevolg van deze markering is, dat op korte afstand veel weefbewegingen nodig zijn en dat de buitenste rijstrook op het plein niet goed wordt gebruikt. In de praktijk leverde de conventionele belijning zoveel problemen op, dat deze steeds meer werd vervangen door spiraalbelijning. De onderschriften bij de figuren 3.23.2 en 3.23.3 in de Richtlijn bebakening en markering (V&W, 1991, afgekort tot RBM-1991) weerspiegelen die ontwikkeling: de concentrische belijning werd aangeduid met de term 'conventionele' markering.



Figuur 5.2-4 Voorbeeld verkeerspleinen met spiraalmarkering volgens Richtlijnen bebakening en markering 2005
(CROW-publicatie 207, CROW 2005a)

Bij Figuur 5.2-3 en Figuur 5.2-4 zijn de volgende opmerkingen te maken:

a) De spiraalbelijning betekent een verbetering t.o.v. de concentrische belijning. Wanneer echter de pleindiameter ca. 100 m bedraagt, blijkt dat de linker rijstrook voor linksafslaand verkeer op het plein niet zo goed gebruikt wordt, omdat de autobestuurder op het plein zelf daarvoor op korte afstand van rijstrook moet wisselen. Dat beperkt de capaciteit voor linksafslaand verkeer.
b) Ter beperking van de breedte van de toeritten zijn de twee linker toeritstroken bestemd voor zowel rechtdoor als linksaf. Het nadeel daarvan is, dat een linksafslaande wachtrij de doorgaande verkeersstroom op de linker rijstrook voor rechtdoor kan blokkeren, terwijl de linker rijstrook voor linksaf op het plein niet goed wordt benut[166]. Dat komt de verkeersafwikkeling niet ten goede, waardoor vaak dan toch nog een poot-voor-poot regeling nodig is.
c) In de richtlijn uit 2005 wordt het verkeersplein uit Figuur 5.2-4 als 'rotonde' aangeduid. Dit is in strijd met – de eerder verschenen – CROW-publicatie 126, waarin het begrip 'rotonde' is voorbehouden aan een verkeersplein dat aan twee eisen voldoet:
    - het verkeer op het verkeersplein heeft voorrang;
    - de takken sluiten radiaal aan en niet tangentieel.

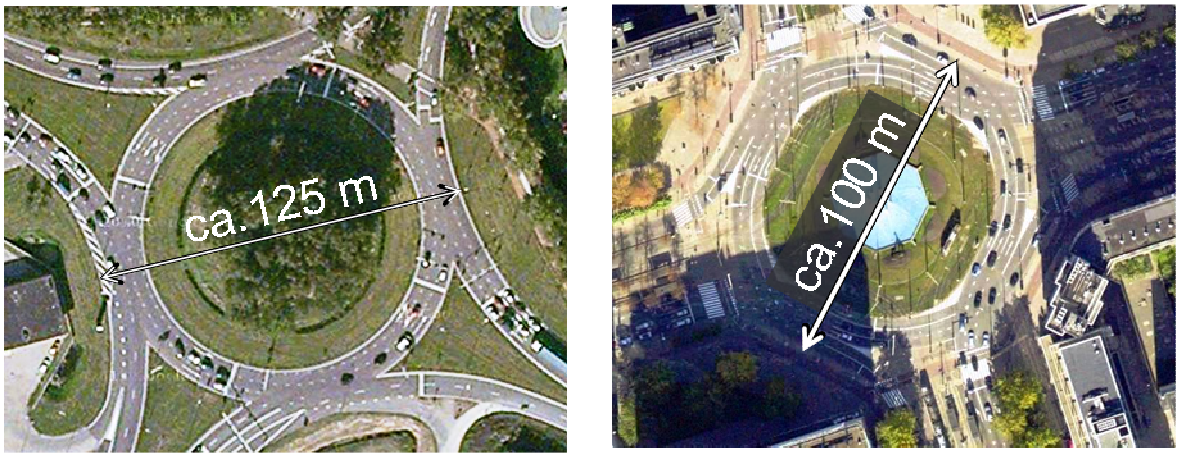
[166] Ondanks dit probleem op de rotonde Kooimeer te Alkmaar bleek in een onderzoek uit 1986 (BGC, 1987), dat de tweefaseregeling een capaciteit heeft die 23 % hoger is en een cyclustijd die 27% korter is dan van een vierfaseregeling. Hierbij moet overwogen worden dat dit gemeten resultaat sterk afhankelijk is van de hoeveelheid linksafslaand verkeer.

In Figuur 5.2-4 sluiten de takken echter tangentieel aan.

Tot slot nog een opmerking over de pijlmarkering: vóór het plein is deze niet echt duidelijk. Er wordt alleen rechtdoor en rechtsaf aangegeven; linksaf ‘bestaat niet’. De RBM-1991 volgend was het onmogelijk in de pijlmarkering het plein als een geheel tot uitdrukking te brengen. Maar ook de aangepaste pleinmarkering in CROW-207 staat dit in de weg. Immers, op het plein moet nog steeds van strook worden gewisseld (Fortuijn, 2000c).

5.2.2 Voorbeelden van variantoplossingen

Als antwoord op optredende problemen in de verkeersafwikkeling worden verkeerspleinen ook voorzien van een belijning waarbij het niet meer nodig is van rijstrook te wisselen. Soms staan voor de linksafslaande stromen al bij het oprijden geheel eigen rijstroken ter beschikking. Hierdoor kan bij een relatief kleine pleindiameter de capaciteit van zo’n plein fors toenemen. Voorbeelden daarvan zijn het Hofplein te Rotterdam (vanuit alle richtingen) en het Baljuwplein te Spijkenisse, waarvan de belijning later in deze zin is aangepast. Zie Figuur 5.2-5 en Figuur 5.2-6.



Figuur 5.2-5 Rotonde Kooimeer te Alkmaar en Hofplein te Rotterdam (Google Maps)



Figuur 5.2-6 Baljuwplein met oorspronkelijke concentrische en aangepaste spiraal markering

In de Nederlandse literatuur ontbreekt echter een systematische bespreking van het belang van de strookmarkering op het plein in relatie tot de (on)mogelijkheden van de toe te passen verkeerslichtenregeling.

5.2.3 Conclusies behandeling traditionele verkeerspleinen

In het verleden zijn grote verkeerspleinen met verkeerslichten in vele varianten gebouwd en soms ook weer aangepast. De analyse heeft zich toegespitst op het ‘standaard’ verkeersplein zoals geschetst in Figuur 5.2-4 ontleend aan CROW-publicatie 207. Samenvattend zijn de zwakke punten van het traditionele verkeersplein met verkeerslichten:

- hoge rijsnelheden op de conflictpunten;
- noodzaak om op het plein van rijstrook te wisselen voor een goede benutting van de stroken voor linksaf;
- een inefficiënt gebruik van de ruimte, waardoor een grote diameter nodig is.

In de praktijk leidden die problemen soms tot aanpassingen van zo’n plein door:

- op de toerit afzonderlijke rijstroken voor linksaf aan te wijzen (Baljuwplein te Spijkenisse voor een deel);
- rijstroken exclusief aan één richting toe te wijzen (Hofplein te Rotterdam).

Als algemene conclusie kan worden geformuleerd, dat de combinatie van verkeerslichten en de noodzaak om tussen opeenvolgende beslispunten van rijstrook te moeten wisselen de verkeersafwikkeling op dit pleintype problematisch maakt.

5.3 Ontwerp turboplein

5.3.1 Ontwerpdoelstelling turboplein

Gelet op de nadelen van het traditionele verkeersplein met verkeerslichten is naar een alternatieve vormgeving gezocht, die aan drie doelstellingen voldoet:

a) goede koersgeleiding;
b) verlaging van de naderingssnelheid vanaf de aanvoertakken;
c) beperking van het ruimtebeslag.

Doelstelling a) leidt tot het verlaten van het ontwerpen van pleinen met één middelpunt. Doelstelling b) leidt tot radiaal laten aansluiten van de aanvoertakken op het plein. Voor doelstelling c) is het nodig dat de rotondesegmenten maximale opstelruimte bieden voor het linksafslaande verkeer, zonder het rechtdoorgaande verkeer te hinderen. Dat levert een maximale opstelcapaciteit op, gegeven de pleindiameter. Daartoe moeten enerzijds de kruisingsvlakken op het plein zo klein mogelijk zijn en anderzijds voor de verschillende rijrichtingen afzonderlijke rijstroken beschikbaar zijn.

In het ontwerp van het turboplein zijn deze drie doelstellingen vertaald in vijf ontwerpkenmerken:

1. een geometrisch ontwerp dat afgestemd is op de spiraalvormige tracering (zonder onnodige bochten) van de rijstroken op het plein;
2. aanvoertakken die radiaal aansluiten;

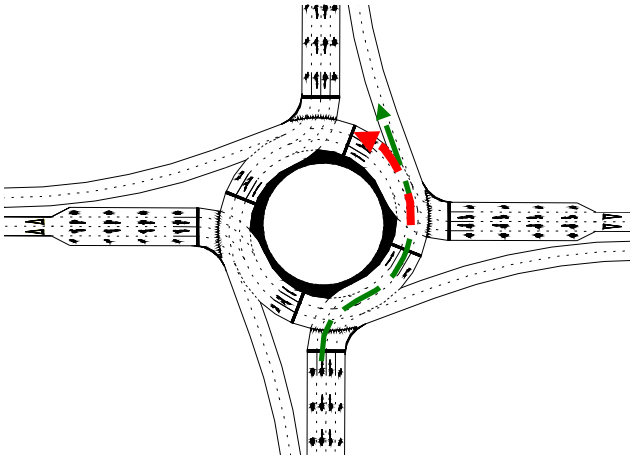
3. afvoertakken die direct voorbij de aanvoertakken het plein verlaten;
4. afzonderlijke rijstroken per richting;
5. overrijdbare rijbaanscheidingen op het plein tussen rijstroken in verschillende richtingen ter voorkoming van het met hoge snelheid afsnijden van de uitbuiging.

Deze kenmerken zijn in stappen in verschillende ontwerpen opgenomen. Deze stappen bieden een goed inzicht in de achtergrond van het huidige ontwerp van het turboplein.

5.3.2 Eerste stap ontwikkeling turboplein

Allereerst is een ontwerp gemaakt, waarbij uitgegaan wordt van bovengenoemde eerste drie ontwerpkenmerken. Het vierde ontwerpkenmerk werd in eerste instantie niet gehanteerd, maar er werd uitgegaan van drie rijstroken op de rotondesegmenten, zoals dat ook het geval is in figuur 3.23.3 uit de RBM-1991. Het verschil met figuur 3.23.3 uit de RBM is echter, dat de linksafstrook op het plein direct tegenover de aansluitende tak begint. In samenhang daarmee krijgt de aanvoertak dan ook een afzonderlijke linksaf-opstelstrook (zie Figuur 5.3-1).

Ontwerpkenmerk 1 wordt gerealiseerd met gebruikmaking van vier translatie-assen waarover de middelpunten verspringen, evenals dat het geval is bij de rotorrotonde (zie Bijlage E.7.3). In dit ontwerp schuiven de rijstroken per segment over de breedte van één rijstrook naar buiten op. De aanvoertakken sluiten radiaal aan en de afvoertakken buigen direct daarna van het plein af. Dit is weergegeven in Figuur 5.3-1. Deze schets is voor het eerst gepubliceerd in een bijdrage aan de Verkeerskundige Werkdagen 2000 (Fortuijn en Carton, 2000a).



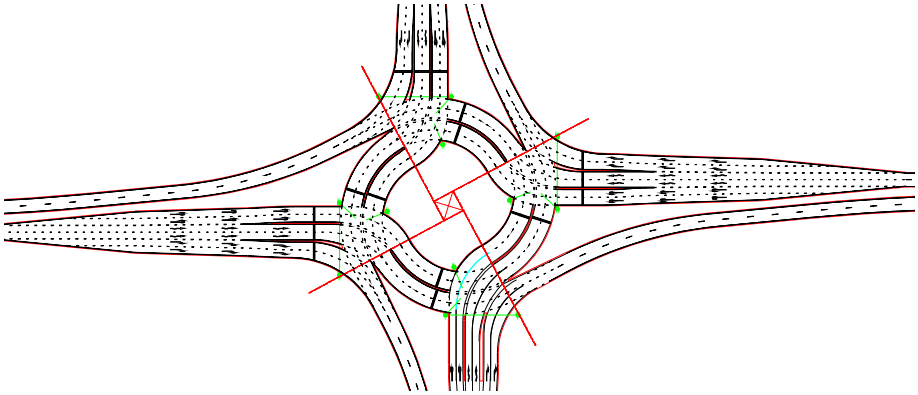
Figuur 5.3-1 Geometrisch ontwerp aan- en afvoertakken op een modern verkeersplein met VRI met keuzestroken op het plein (grote kans op blokkade)

In dit ontwerp is het niet meer nodig om op het plein van rijstrook te wisselen. Wel bevinden zich op het plein nog steeds keuzestroken, waarop men kan kiezen om het plein te vervolgen of te verlaten. Op een rotonde zonder verkeerslichten bieden deze stroken, die voor verschillende richtingen worden gebruikt, grote voordelen: daarmee kan een rotonde optimaal wisselende belastingpatronen verwerken. Maar, zoals in paragraaf 5.2.1 is opgemerkt, op een plein dat geregeld wordt met verkeerslichten, hebben keuzestroken een groot nadeel: waar het linksafslaande verkeer en het rechtdoorgaande verkeer een strook delen, blokkeren wachtende auto’s voor een rood verkeerslicht voor linksaf al snel de doorgang voor auto’s die het plein willen verlaten. Dit belemmert veelal het goed functioneren van een plein met een kleine diameter. Op grond van deze kwalitatieve analyse van de verkeersafwikkeling wordt afgezien van een kwantitatieve vergelijking van dit ontwerp met een viertakskruispunt. Alleen al het feit, dat een standaard viertakskruispunt zich niet kenmerkt door een gemeenschappelijk

gebruik van een strook door zowel het rechtdoorgaande als het linksafslaande verkeer, maakt een vergelijking voor het doen van generaliserende uitspraken moeilijk.

5.3.3 Basisontwerp Turboplein

Gelet op de problemen die de oplossing uit Figuur 5.3-1 kan opleveren, is uitgaande van dit idee een turboplein ontwikkeld waar elke richting op het plein exclusieve rijstroken heeft. Voor de eenvoud is in het basisontwerp daarbij uitgegaan van twee rijstroken per richting. Zie Figuur 5.3-2.



Figuur 5.3-2 Turboplein met VRI en exclusieve stroken per richting

Afhankelijk van het belastingpatroon kan het aantal rijstroken per richting worden gevarieerd. De kenmerken van dit ontwerp zijn samengevat:

- De toerit sluit radiaal aan op het plein om de snelheid te verlagen en het oppervlak van de kruisingsvlakken te beperken.
- De volgende afrit verlaat het plein tangentieel om de opstellengte op het plein van het volgende kwadrant te vergroten.
- De rijstroken rechtdoor en linksaf zijn exclusief per richting, waardoor de opstellengte op het plein voor linksafverkeer tweemaal groter is dan bij combinatie van deze rijrichtingen.
- De rijstroken voor de verschillende richtingen op het plein worden gescheiden door overrijdbare fysieke afscheidingen van 30 cm breed. Deze worden al op de toeritten ingeleid. Deze overrijdbaar verhoogde baanscheidingen beogen een verbetering van de koersgeleiding op het plein en beperking van het afsnijden van bochten.
- De boogstralen zijn vrij krap; de binnenstraal van het hier besproken plein bedraagt 30 m.
- De breedte van de rijbanen verloopt: na de overgang van de aansluitende toerit is de breedte van de binnenste pleinbaan 10 m, een kwart segment verder is deze 9 m. Een half segment verder is de breedte teruggebracht tot 8 m, waarmee de pleinbaan overgaat in de dubbelstrooks afrit. Deze breedte is zo gekozen om ervoor zorg te dragen dat twee vrachtwagencombinaties naast elkaar met voldoende ruimte op het plein kunnen rijden.
- De rijstroken op het plein zijn zo getraceerd, dat de boogstraal na de inrijboog alleen groter wordt (en niet wisselend groter en kleiner). Hiertoe worden in het pleinontwerp gebruik gemaakt van verspringende middelpunten.
- Aan de kant van het rotondecentrum wordt een ‘buitenwaartse’ bochtverbreding (uitbuiging richting pleincentrum) aangebracht, om een vrachtwagen die het meest links rijdt de gelegenheid te bieden bij het oprijden van het plein voldoende afstand te houden tot een (groot) voertuig naast zich.

- De rijkant van de kantmarkering ligt op 45 cm afstand van de rijbaankant of de geleidingsband.

Voor de ontwerpmethodiek wordt verwezen naar Bijlage E.7.

5.3.4 Doorrijsnelheid personenauto's

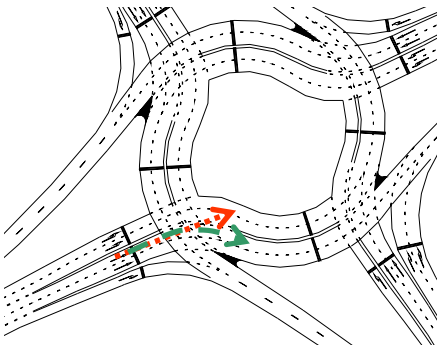
De doorrijsnelheid van personenauto's op een plein rechtdoor, wordt bepaald door de uitbuiging van de rijcurve. Deze uitbuiging is afhankelijk van drie factoren:
- de binnenstraal van het plein;
- de rijbaanbreedte;
- de positionering van de aanvoertak t.o.v. het middelpunt van het plein.

Doordat de rijbanen van een turboplein uit twee rijstroken bestaan, is het in de stille uren mogelijk om bochten af te snijden. Bij een turboplein bepaalt de benodigde opstellengte de pleindiameter. De berijdbaarheid voor vrachtauto's bepaalt de rijstrookbreedten. De doorrijsnelheid kan dan nog alleen beperkt worden door de positie van de aanvoertak t.o.v. het plein: hoe verder naar links, hoe groter de hoekverdraaiing en daarmee hoe kleiner de doorrijsnelheid bij afsnijden wordt. Maar ook aan het naar links toe opschuiven van de aanvoertak zijn grenzen. Als deze te ver naar links opschuift, dreigt er een ander gevaar: onduidelijk wordt hoe de rijkoers verder moet zijn, naar links of naar rechts. In de afweging van beide zaken is gekozen om de aanvoertakken zo te positioneren dat het verlengde van de linker 'wegkant' van de rechtdoorstrook door het middelpunt van het plein loopt (zie Figuur E.7-1 in de bijlage).

5.4 Turboplein met brede verkeersgeleiders

Markeringsprobleem op een compact turboplein

Als een plein wordt aangelegd zoals beschreven in paragraaf 5.3.3, vindt bij het oprijden van het plein de koersgeleiding voor de rechtdoorgaande beweging uitsluitend via de markering plaats. Echter, lijnmarkering schiet daarvoor te kort (zie Figuur 5.4-1). Alleen met behulp van robuuste wegdekleds is deze koersgeleiding wel goed uit te voeren. Maar die waren niet leverbaar op het moment dat de eerste turbopleinen gebouwd werden. Om het risico op deze foutmanoeuvres bij het oprijden van het plein te voorkomen is gekozen voor een alternatieve oplossing: overrijdbare verkeerseilanden op het plein. Zie Figuur 5.4-2.



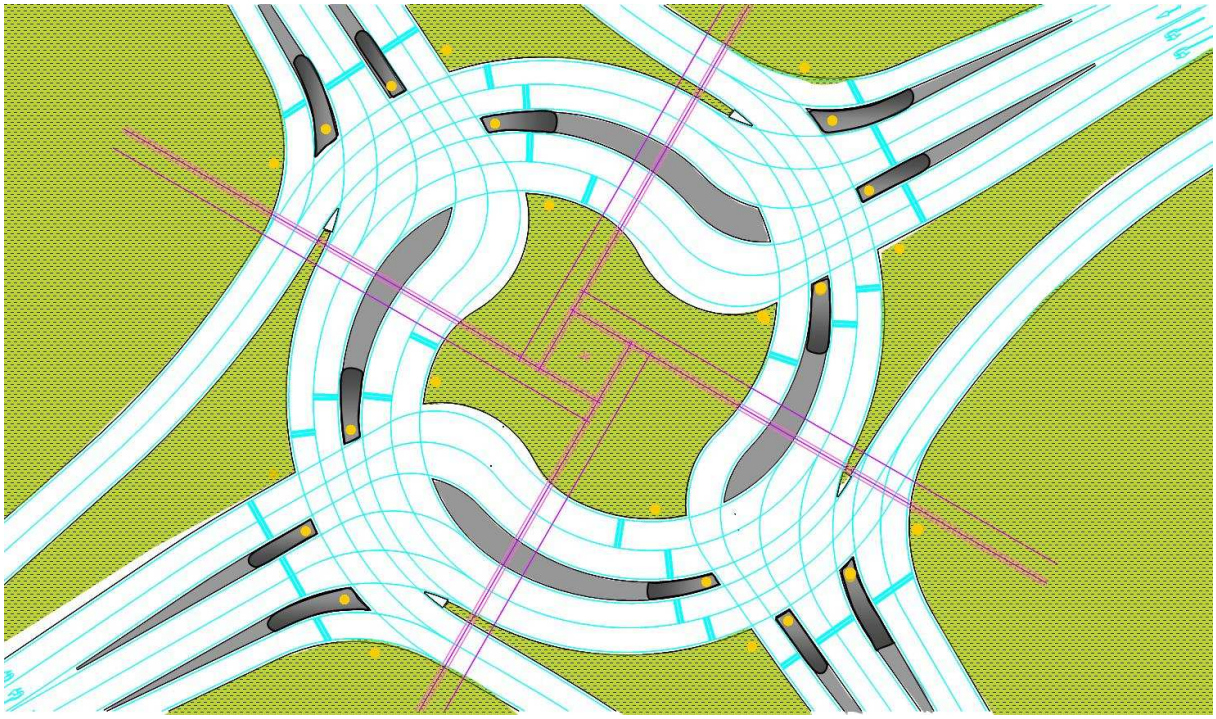
Figuur 5.4-1 Risico op foute manoeuvre bij compacte vormgeving turboplein

Overrijdbare verkeersgeleiders

Een overrijdbare verkeersgeleider heeft de voorkeur boven een niet-overrijdbare oplossing om twee redenen:

- een niet-overrijdbare geleider moet gemarkeerd worden door een bord, dat op zich zelf weer het risico van aanrijden verhoogt;
- een overrijdbaar verhoogde geleider maakt het altijd nog mogelijk om een aanvankelijke foute rijbaankeuze met lage snelheid te herstellen, of een fout van een mede weggebruiker op te vangen. In termen van Duurzaam Veilig wordt dit ook wel het 'vergevingsgezinde' aspect van een oplossing genoemd.

Het belangrijkste doel van deze verkeerseilanden is het verkrijgen van een betere geleiding. Maar ze hebben ook een nadeel: het overzicht over het plein wordt bemoeilijkt. Dit geldt met name personenautobestuurders; bestuurders van vrachtauto's blijken een veel beter overzicht te hebben (Horst, van der, e.a. 2008).



Figuur 5.4-2 Turboplein met verkeerseilanden (aantal rechtsaf- en linksafstroken varieert)

Vanwege de meervoudige functie van de verkeerseilanden (naast een geleidende functie ook een functie als 'foutherstelzone' en het bieden van ruimte voor de VRI-masten) dient het eerste gedeelte (gerekend in rijrichting) overrijdbaar te zijn; bijvoorbeeld uitgevoerd in basalton, 7 cm hoog en begrensd door een rammelstrookband. Dit is lager dan op de reeds aangelegde turbopleinen is toegepast, om het overzicht over het plein zo min mogelijk te hinderen. In de aanrijrichting moet het verkeerseiland met een hoger bandje (11 cm), worden begrensd, omdat dat deel van het verkeerseiland op een obstakel moet attenderen. Op dat deel kan ter hoogte van de stopstrepen op de toerit dan een verkeerszuil D03BB22 (CROW, 2005) met bord D3 ('Bord mag aan beide zijden worden voorbij gegaan') worden geplaatst. Wel moet dat hoge deel zo snel mogelijk weer aflopen tot 7 cm, omdat een hoge verkeersgeleider vooral voor personenautobestuurders het overzicht op de situatie belemmert.

Ter hoogte van de stopstrepen op het plein kan een zwart-witte zuil als obstakelbebakening worden gebruikt (zie figuur 3.12 CROW-207), evenals op het splitsingspunt tussen plein en afslaande tak (voor zover daar verderop zich obstakels bevinden).

De ontwerpmethodiek van turbopleinen met brede verkeersgeleiders is toegelicht in Bijlage E.7.3.

5.5 Bebording en markering turboplein

5.5.1 Uitgangspunten bebording en markering turbopleinen

Essentieel voor een turboplein is, dat de richtingkeuze plaatsvindt via de keuze van de juiste voorsorteerstrook. Dat stelt hoge eisen aan de kwaliteit van de bewegwijzering, de verkeersborden en de markering. Dit is een aspect dat vaak door verkeerstechnici wordt onderschat. Het belang van de bebording en markering is bij een turboplein extra groot omdat de verkeersdeelnemer relatief kort vóór het plein met vijf of zes rijstroken wordt geconfronteerd: de benodigde lengte van de voorsorteerstroken zal in de praktijk eerder bepaald worden door het proces van voorsorteren dan door de lengte van de wachtrijen.

Het turboplein verschilt zowel van de rotonde als van een traditioneel verkeersplein met verkeerslichten. Het verschil met de rotonde is, dat het plein met een groot aantal rijstroken wordt genaderd. Dat heeft het turboplein gemeen met een traditioneel verkeersplein. Het verschil met een traditioneel verkeersplein is echter, dat de snelheid waarmee het verkeer het plein kan oprijden veel lager is, omdat de takken radiaal aansluiten. De bebording moet dan zodanig zijn, dat dit voor de weggebruiker vanaf grotere afstand al duidelijk is.

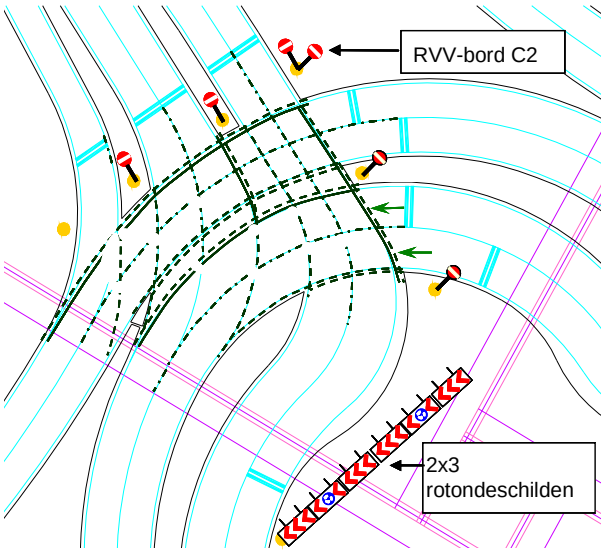
In feite nadert de verkeersdeelnemer een complexe T-aansluiting, met verplichte rondgaande rijrichting. RVV-bord D1 (‘Rotonde, verplichte rijrichting’) duidt dat het beste aan. Combinatie met een hekwerk ligt voor de hand. Maar dat schiet toch te kort.
Uit onderzoek (ETSC, 1996) is bekend, dat voor verkeer dat met hoge snelheid nadert, een hekwerk onvoldoende is om een scherpe bocht aan te geven. Het meest effectief is een visuele afscherming van de horizon vanuit de naderingsrichting. Bij duisternis kunnen bochtschilden en daarvan afgeleid rotondeschilden de zichtbaarheid ondersteunen. Daarbij is van belang dat de horizon in het verlengde van alle rijstroken op de aanvoertakken wordt afgeschermd. Opmerkelijk is dat dit niet in richtlijnen wordt vermeld. Essentieel is, dat de afscherming visueel ‘hard’ is, maar fysiek ‘zacht’. Dat betekent: visueel moeten de schilden in het middeneiland van het plein onontkoombaar op de weggebruiker afkomen, terwijl ze bij aanrijding zonder veel energie in hun geheel naar achteren omvallen.

5.5.2 Verkeersborden en rijstrookmarkering op het plein

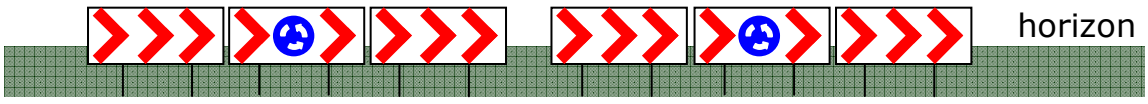
Het nadeel van brede verkeersgeleiders op een verkeersplein is, dat dit minder als plein wordt ervaren. Extra voorzieningen t.a.v. markering en bebording zijn nodig om te bereiken dat de verkeersdeelnemer de verkeerssituatie ter plaatse van elke deelkruising juist interpreteert. Maatregelen zijn:
a) De rotondeschilden over de gehele breedte tegenover de toerit plaatsen.

b) Borden plaatsen die aangeven dat die rijbaan voor verkeer in tegengestelde richting bedoeld is (‘Niet inrijden’, bord C2 RVV), zowel op het plein links van de toerit in de ‘uitmondingen’ van de binnenste rijbaan op het plein als bij de uitmondingen van de toeritten voor linksaf en rechtdoor.
c) De ‘kantlijnen’ die over de kruisingsvlakken lopen, markeren met 1-1 strepen (i.p.v. met 1-3 strepen, zoals aanvankelijk werd gedaan).
d) Aan de rechterkant van de rotondebanen en aan de linkerkant van de rijbanen vanaf de toeritten aanvullend een doorgetrokken streep aanbrengen aan de rijkant van de 1-1 streep – in aanvulling op RVV-artikel 78 wat het wisselen van rijstrook toch al verbiedt, maar wat bij weinigen bekend is (Fortuijn en De Bosch Kemper, 2006).

Maatregel a) kan worden vormgegeven door twee maal drie rotondeschilden in het middeneiland naast elkaar te plaatsen in het verlengde van de rijstroken op de aanvoertakken voor zowel linksaf als rechtdoor. Zie Figuur 5.5-2, cf. het advies in TNO-rapport *Evaluatie geregelde turbopleinen* (Horst, Van der, et al. 2008). Dan is zowel voor degenen die rechtdoor als die linksaf willen, duidelijk dat men eerst een bocht naar rechts moet maken. Aanvankelijk ontbraken op de twee gerealiseerde turbopleinen in de N471 tussen Pijnacker en Rotterdam de schilden tegenover de aanvoerstroken voor linksaf. In het begin is daar spookrijden geconstateerd.



Figuur 5.5-1 Markering en extra borden i.v.m. routegeleiding op turboplein met brede verkeersgeleiders



Figuur 5.5-2 Extra rotonde- en bochtschilden tegenover de linker toerit

Maatregel b) is vergelijkbaar met het bebordingsprincipe dat ook wordt toegepast bij het aangeven van de verplichte rijrichting van éénrichtingsstraten. Het verwachte effect daarvan is overigens niet groot; informatie via het wegdek is effectiever.

Maatregel d) is in combinatie met maatregel c) nodig, omdat niet alleen de 1-3 markering maar ook de dichtere 1-1 markering tekort schiet voor een goede geleiding op complexe kruispunten. Immers bijna geen weggebruiker weet, dat de Hoge Raad (op 10 februari 1998)

heeft bepaald, dat ook op een verkeersplein of rotonde niet van rijstrook mag worden gewisseld, als pijlen op de toerit vóór het plein rijstroken aan bepaalde richtingen toedelen. De betekenis van dubbele markering, bestaande uit één onderbroken en één getrokken streep is bij de weggebruiker beter bekend. In ieder geval helpt die markering de weggebruiker om de gevaarlijkste manoeuvres na te laten.

Ook kan lijnmarkering die op kruisingsvlakken door elkaar heenloopt, verwarrend werken. Elementen die hiervoor het meest verantwoordelijk zijn dienen vermeden te worden. Dat betekent dat de 1-1-markering niet volgens een strak patroon moet worden aangebracht, maar zo moet worden aangepast, dat:

- de lijnelementen van elkaar kruisende markering geen gesloten stompe hoek vormen;
- de lijnelementen van elkaar kruisende markering geen gesloten scherpe hoek vormen, waarvan het hoekpunt tegen de rijrichting in wijst.

Er moet voor worden gezorgd, dat de lijnstukken minstens 1 m vanaf het fictieve hoekpunt beginnen. Haakse hoeken en scherpe hoeken waarvan de hoekpunten in de rijrichting wijzen mogen wel voorkomen. De doorgetrokken strepen aan de linkerkant van de linker toeritbaan en aan de rechterkant van de rechter pleinbaan kunnen gewoon doorgetrokken worden aangebracht. Dat geldt niet van de doorgetrokken strepen aan de linkerkant van de rechter toeritbaan en aan de rechterkant van de binnenste pleinbaan: die moeten over een afstand van 1 m onderbroken worden op die plaatsen waar ze anders een gesloten stompe hoek zouden vormen met de kruisende markering. Op de rotondebaan waarop de toerit invoegt, kan de doorgetrokken streep langs het rijpad van de toerit beter achterwege blijven. Het is van groot belang het bovenstaande ook zo in het markeringsbestek op te nemen, zo nodig verduidelijkt met detailtekeningen.

Eind 2007 waren (tijdens genoemd TNO-onderzoek, zie Tabel 6.6.2) de markering en bebording op de turbopleinen Doenkadeplein[167] (N209/N471) te Rotterdam en Tolhekplein[168] (N470/N471) te Pijnacker nog niet in overeenstemming met deze inzichten.

5.5.3 Pijlmarkering op het plein

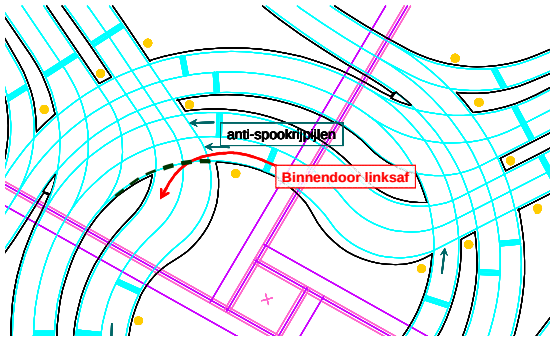
In de publicatie *Rotonde-pijlmarkering* (Fortuijn, 2000c) is ook een nieuwe pijlmarkering gepresenteerd voor toepassing op turbopleinen. Maar geconstateerd moet worden dat op het plein eigenlijk in het geheel niet meer sprake is van keuzemomenten. Tegen die achtergrond kunnen in principe pijlen op het plein achterwege blijven. Echter, zolang er geen wegdekleds toegepast kunnen worden, is het aan te bevelen om op de binnenste rijstroken van het plein anti-spookrijpijlen te plaatsen achter de stopstreep. Dit is dan een specifieke toepassing van de anti-spookrijpijl: vlak voor het kruisingsvlak, niet op een autosnelwegafrit[169].

[167] Het Doenkadeplein is het eerste turboplein dat in 2006 gerealiseerd, als onderdeel van de aanleg van de N471- N470 naar Zoetermeer, waarbij de T-aansluiting N471/N209 is vervangen.

[168] De naam Tolhekplein is geen officiële straatnaam, maar de werknaam die door de provincie Zuid-Holland wordt gebruikt. Het Tolhekplein is in 2006 partieel in gebruik genomen omdat de doortrekking van de N470 richting Delft nog niet gereed was (in 2008 gerealiseerd).

[169] Dit idee is afgeleid van een publicatie van de FHWA, die deze pijlen toepast op de Diverging Diamond Interchange (Gevlochten Haarlemmermeeraansluiting).

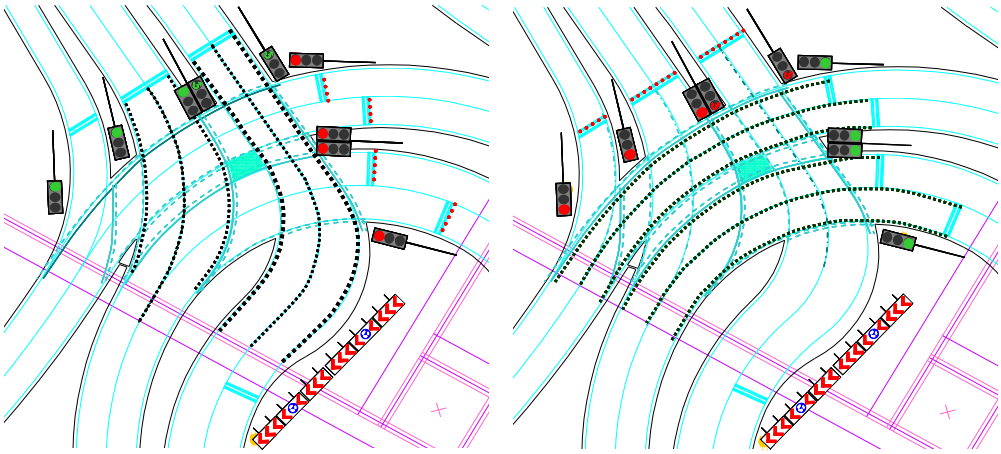
Deze anti-spookrijpijlen kunnen naar verwachting ook een belangrijke bijdrage leveren in het terugdringen van het relatief hoge percentage ‘binnendoor linksaf’-manoeuvres, die in genoemd TNO-onderzoek zijn waargenomen. Deze manoeuvre vormde de grootste groep (46,2 %) van het totaal aantal onjuiste manoeuvres (≈ 2,5 promille). Een licht gebogen schacht (R= 40 m) kan de suggestie versterken om gewoon de rijbaan te blijven volgen.



Figuur 5.5-3 ***Anti-spookrijpijlen ter vermindering van de ‘linksaf-binnendoormanoeuvres***

5.5.4 Wegdekleds

De routegeleiding op het plein wordt gegeven door de rijstrookmarkering, die goed wordt onderhouden. Omdat veel weggebruikers niet gewend zijn om op pleinen en kruispunten de wegmarkering te volgen, is het zeer aan te bevelen de rijstrookmarkering te ondersteunen met – ook in de dwarsrichting – goed overrijdbare wegdekleds, die oplichten wanneer de betreffende richting groen is.



Figuur 5.5-4 ***Rijpad-ondersteuning met wegdekleds;*** *zeer gewenst op een plein met brede geleiders, noodzakelijk op een plein met smalle verkeersgeleiders*

5.5.5 Bewegwijzering en pijlmarkering op de voorsorteervakken

Besliswegwijzers

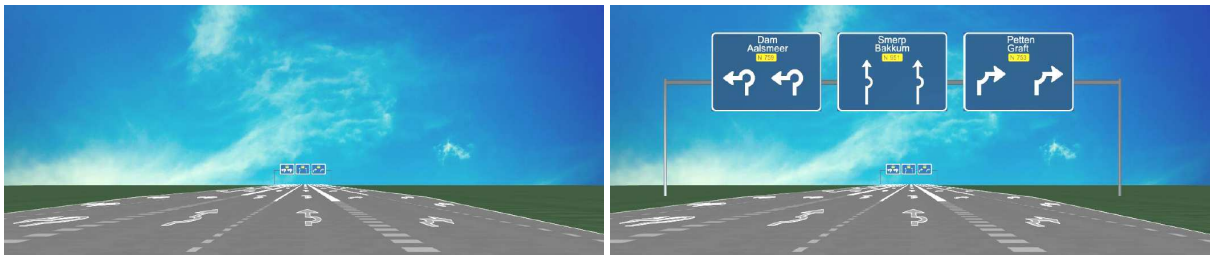
Hoe groter het aantal rijstroken is, hoe moeilijker het is voor bestuurders om de rijstrookindeling te overzien. Wegwijzers op portaal boven de betreffende rijstroken zijn bij vier en meer rijstroken van groot belang voor het nodige overzicht. Het aantal pijlen op de strookwegwijzers moet corresponderen met het aantal rijstroken. Figuur 5.5-5 beeldt de strookwegwijzers af voor een situatie waarin de toerit naar het turboplein bestaat uit twee rijstroken voor linksaf, twee voor rechtdoor en twee voor rechtsaf.



Figuur 5.5-5 Besliswegwijzers in de vorm van strookwegwijzers

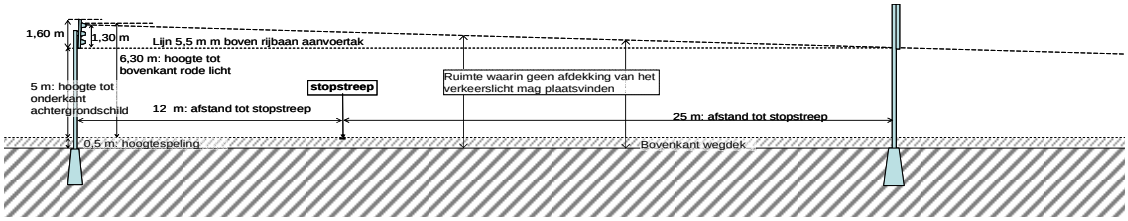
Plaats van de besliswegwijzers

Op gebiedsontsluitingswegen wordt in Nederland de plaatsing van wegwijzers gedefinieerd ten opzichte van het eerste actiepunt: *nulpunt*. Dat is het punt waar de weg zich gaat verbreden naar afzonderlijke voorsorteerstroken. Het beginpunt van een verhoogde rijstrookscheiding (aan het eind van de opstelstroken voor de verschillende richtingen) markeert het volgende beslispunt in de richtingkeuze. Dit is het *divergentiepunt*. Uitvoegen op het nulpunt voorkomt weefproblemen verderop. Bij meer dan vier rijstroken biedt een portaal met besliswegwijzers aan het begin van het voorsorteervak een goede ondersteuning voor het overzicht (zie Figuur 5.5-6). Dat betekent dan wel, dat de voorsorteervakken zo lang dienen te zijn, dat twee portalen qua redundantie functioneel zijn (bij voorkeur meer dan 150 m uit elkaar). Wanneer de afstand kleiner wordt dan 125 m, wordt aangenomen dat het niet meer zinvol is om twee portalen met besliswegwijzers te plaatsen. Maar dan kan men verwachten dat er problemen voor de weggebruikers bij het voorsorteren optreden, zoals is geconstateerd in het TNO-onderzoek *Evaluatie geregelde turbopleinen* (Horst, Van der, et al. 2008).



Figuur 5.5-6 Visueel effect van besliswegwijzers op portaal aan het begin van de voorsorteerstroken

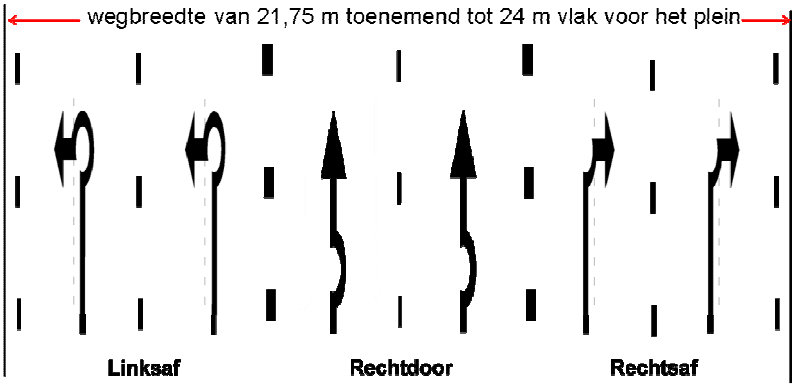
In de nieuwe (uit te brengen) richtlijnen voor de bewegwijzering in Nederland wordt aanbevolen het eerste portaal met beslissingswegwijzers 30 m na het nulpunt te plaatsen. Het tweede portaal komt ter plaatse van het begin van de verhoogde strookscheidingen (op minimaal 40 m voor de stopstreep). Meer naar voren is vanwege de lage snelheid niet nodig en ongewenst omdat de weggebruiker daarna geen informatie meer krijgt over de richtingkeuze. Hierbij wordt er wel van uitgegaan dat de verkeerslichten op masten zijn geplaatst. Als de verkeerslichten op portaal zijn geplaatst, moet voorkomen worden dat de wegwijzerborden de verkeerslichten afdekken (zie Figuur 5.5-7). Ervan uitgaande dat de hoogte van de onderkant van de verkeerslichten gelijk is aan die van het wegwijzerbord en rekening houdend met een ooghoogte van 2,60 m van vrachtautobestuurders en een stopzichtafstand van 105 m, dient de afstand tot het portaal met verkeerslichten 37 m te zijn. Bij een plaatsing van het verkeerslichtenportaal op 12 m achter de stopstreep, komt het wegwijzerportaal 25 m voor de stopstreep.



Figuur 5.5-7 Maatvoering wegwijzer op portaal ter plaatse van de stopstreep in combinatie met VRI-portaal

Wegdekpijlen in het vak met voorsorteerstroken

Uit het TNO-onderzoek naar de begrijpelijkheid van rotondepijlen op voorsorteervakken (Martens, 2001) is gebleken dat pijlmarkering met het rotondesymbool op voorsorteervakken de rijstrookkeuze in relatie tot de afslagrichting goed ondersteunen. De symbolen van de wegdekpijlen uit Figuur 5.5-8 stemmen overeen met die op de wegwijzers boven de betreffende rijstroken.



Figuur 5.5-8 Pijlmarkering op aanvoertakken van turbopleinen

Omdat de weggebruiker in vrij korte tijd moet kiezen uit vijf of zes rijstroken, dienen de pijlen op de voorsorteerstroken in overvloed herhaald te worden. Vanwege de bedekking door voorliggers wordt vier maal als een minimum aangenomen. Om dat te realiseren is een afstand van 15 m tussen de pijlpunten (en een tussenafstand van 15- 6,80 = 8,20 m) aan te bevelen.

5.5.6 Bewegwijzering en pijlmarkering vóór de voorsorteervakken

Probleemstelling

Zoals in het vervolg zal worden aangetoond, zijn de wachtrijen voor een turboplein over het algemeen zeer kort. Daarom wordt de lengte van de opstelvakken niet door de verkeersafwikkeling maar door de rijstrookkeuze bepaald. Daarbij is het ook van groot belang, dat de verkeersdeelnemer al voor het bereiken van de opstelvakken optimaal op de rijstrookkeuze wordt voorbereid. De vraagstelling die hiermee verband houdt, is: welke combinatie van bewegwijzering en pijlmarkering biedt de beste informatie aan de weggebruiker, opdat deze bij het bereiken van de voorsorteerstroken zo snel mogelijk de juiste strook kiest?

Voorwegwijzers op de aanvoertakken van turbopleinen

Bij het ontwerpen van een bewegwijzeringsysteem doet zich het dilemma voor tussen:

- onduidelijkheid door onvolledige informatie
- onduidelijkheid door overvloedige informatie

Dit dilemma kan worden geïllustreerd aan de hand van twee ontwerpen die overwogen zijn voor toepassing als voorwegwijzer vanuit een enkelstrooks aanvoertak naar een turboplein. Hoewel de configuratie in het rechter plaatje (complexe strookwisselwegwijzer) van Figuur 5.5-9 de situatie verderop adequater weergeeft dan in het linker (eenvoudige strookwisselwegwijzer), kiezen weggebruikers sneller de juiste voorsorteerstrook na een voorwegwijzer van het linker plaatje (Boon e.a., 2011). Deze is minder complex, maar geeft wel aan dat men naar links moet voorsorteren als men naar links wil afslaan. Zie Tabel 5.5.1, toegelicht in Bijlage H. In genoemd onderzoek is o.a. de reactietijd gemeten in het kiezen van de juiste rijstrook bij het nulpunt (dat is de situatie 200 m verderop, zie Figuur 5.5-6; in het onderzoek weergegeven door één van de vier afbeeldingen van Figuur H.3-1 of H.3-2). Op een touch screen moesten de respondenten de rijstrook van keuze aangeven.



Figuur 5.5-9 Twee varianten voor een voorwegwijzer op een enkelstrooks aanvoertak naar een turboplein met twee rijstroken voor rechtdoor

Tabel 5.5.1 Reactietijd bij voorsorteervakken bij verschillende voorwegwijzers

Vorm voorwegwijzer	Enkelstrooks aanvoertak	Tweestrooks aanvoertak
Standaard voorwegwijzer	1,95 s	2,02 s
Eenvoudige strookwisselwegwijzer	1,84 s	2,00 s
Complexe strookwisselwegwijzer	2,06 s	2,15 s
p{H_0=kolomcellen gelijk}	36%	47%

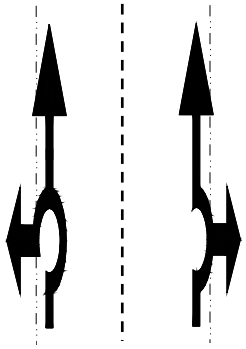
Ook is de situatie met een traditionele voorwegwijzer (met een eenvoudig rotondesymbool) gemeten. De resultaten wisselen per leeftijdscategorie: ouderen blijken meer moeite te hebben met een nieuw bord. Doordat in het onderzoek de camerapositie hoog is gekozen (veel hoger dan in Figuur 5.5-6), was het overzicht bij het nulpunt in feite te goed. In combinatie met de gebruikte onderzoekstechniek geven de gemeten reactietijden mede daardoor vermoedelijk een te geflatteerd beeld. Daarnaast was het onderzoek zeer beperkt van opzet: de variantie-analyse laat een hoge foutkans (van 35% respectievelijk 47 % op het onterecht verwerpen van de nulhypothese: er is geen verschil) zien, zodat het nodige voorbehoud gemaakt moet worden ten aanzien van de te trekken conclusies op grond van dit onderzoek. Overigens stemmen de uitkomsten wel overeen met de voorkeur die een expertgroep van het Platform

Bewegwijzering (CROW) in tweede instantie (na uitbreiding met Van der Horst als gedragswetenschapper) heeft uitgesproken. Voor verdere details wordt verwezen naar Bijlage H.

Wegdekpijlen op aanvoertak met twee rijstroken

Het kiezen van de juiste voorsorteerstrook bij vijf of zes voorsorteerstroken is voor verkeersdeelnemers een lastige zaak. Zeker bij het linksafslaan voor (langzame) vrachtauto's vanaf de rechter aanvoerstrook. Voor de snelle automobilist kan dit het geval zijn bij rechtsafslaan vanaf de linker rijstrook. Daarom is het gewenst een verbreding van twee rijstroken naar vijf of meer korte voorsorteerstroken (150 m) in te leiden met combipijlen op de twee rijstroken op de aanvoertak: rechtdoor–rechtsaf en rechtdoor–linksaf. Uitgaande van een waarneemtijd van 5 s en een reactietijd van 2,5 s voor oudere verkeersdeelnemers (Staplin et al, 1998 en 2001) en een naderingssnelheid van 25 m/s betekent dit, dat op een aanvoertak met twee rijstroken over een lengte van 180 m combipijlen aangebracht moeten worden. Deze pijlen helpen de bestuurders om al op de aanvoertak de juiste strook te kiezen, zodat het kiezen van de juiste voorsorteerstrook verderop eenvoudiger wordt. Het verschil in strookgebruik op de aanvoertak is significant[170] (zie Bijlage H.4).

Figuur 5.5-10 Inleidende combipijlen



5.5.7 Conclusies bebording en markering

Op een turboplein zijn rotondeschilden die de horizon over een voldoende breedte afschermen essentieel. Een turboplein met brede verkeersgeleiders wordt door sommige weggebruikers niet als één geheel ervaren, zodat de bebakening en markering ook per deelkruising geen aanleiding mogen geven tot misverstanden.

Op de aanvoertakken stelt het grote aantal rijstroken in combinatie met de korte voorsorteervakken hoge eisen aan de kwaliteit van de bewegwijzering, de verkeersborden en de markering. Door de auteur is een nieuw type voorwegwijzer ontwikkeld, om de weggebruiker voor te bereiden op de keuze van de juiste voorsorteerstrook in relatie tot de bestemming. Bij een wegwijzer vormen onduidelijkheid door onvolledigheid enerzijds en

[170] Dit aspect gaf in genoemd onderzoek wel een significant resultaat. Ervan uitgaande dat het maken van een fout (in de keuze van de rijstrook op de aanvoertak) benaderd mag worden als een Poissonproces, bedraagt in genoemd onderzoek de foutkans dat de nulhypothese (dat pijlen geen verschil uitmaken) onterecht verworpen wordt 0,3 %. Als niet van een Poissonverdeling zou mogen worden uitgegaan (wanneer het blijven rijden op de rechter rijstrook niet als een 'fout' wordt aangemerkt), bedraagt de foutkans op een onterechte verwerping van de nulhypothese 1,6 %. (berekend met een kruistabel rekening houdend met de continuïteitscorrectie van Yates). In beide benaderingen is het verschil tussen wél of géén wegdekpijlen significant.

complexiteit anderzijds een dilemma. Een onderzoek van beperkte omvang wijst in de richting van het vermoeden, dat concessies aan volledigheid inderdaad noodzakelijk zijn voor een optimaal resultaat.

5.6 Vergelijking met andere kruispuntoplossingen

5.6.1 Afwegingsaspecten

Voor een verantwoorde keuze van een verkeerskundige oplossing in de vorm van een turboplein is een afweging nodig met andere mogelijke kruispuntoplossingen. De aspecten die bij zo'n vergelijking een rol spelen zijn onder andere:

a) verkeersafwikkeling in termen van capaciteit en verliestijd;
b) veiligheid;
c) ruimtebeslag;
d) investerings- en onderhoudskosten;
e) milieuaspecten (geluid en emissie).

Om deze in principe onvergelijkbare aspecten onderling te kunnen afwegen kan gebruik gemaakt worden van een economische waardering. Voor de aspecten a) t/m d) zijn vrij algemeen geaccepteerde methoden beschikbaar om tot een macro-economische kosten-batenverhouding te komen. Voor het milieuaspect ligt dat gecompliceerder, zowel ten aanzien van de economische waardering daarvan, alsook de specifieke omgevingsfactoren die een rol spelen. Deze studie beperkt zich tot de twee eerstgenoemde aspecten (zie voor het aspect veiligheid paragraaf 6.5)

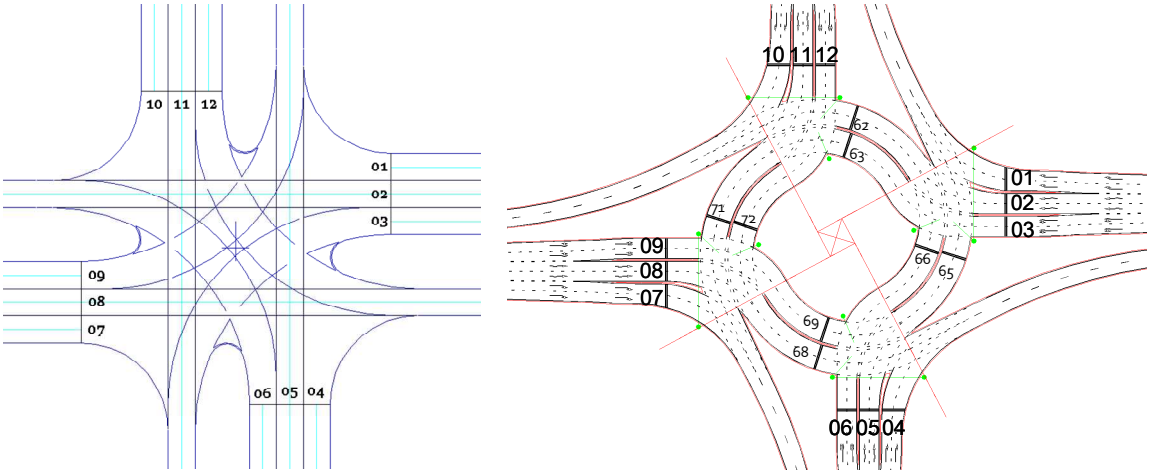
5.6.2 Verkeersafwikkeling

Onderstaand wordt de verkeersprestatie van een turboplein vergeleken met die van een viertakskruispunt (Fortuijn en De Leeuw, 2003b). Daarvoor is een analytisch model gemaakt, de TURBOPLEINVERKENNER. Dat model is gedocumenteerd in Bijlage G.

Voor zowel het viertakskruispunt als het turboplein is uitgegaan van eenzelfde aantal rijstroken, namelijk twee per richting. Als maatgevende capaciteit van het viertakskruispunt is het moment gedefinieerd waarop de cyclustijd de grens van 120 seconde bereikt. In principe geldt dat ook voor het turboplein, maar bij een toenemende hoeveelheid linksafslaand verkeer is de opstellengte op het plein bepalend voor een kortere cyclustijd en daarmee voor de capaciteit.

Voor de overzichtelijkheid zijn de intensiteiten van alle richtingen door middel van vier factoren afhankelijk gesteld van de rechtdoorrichting van de zwaarst belaste tak, richting 02:

- factor a) verhouding richting 08 t.o.v. richting 02;
- factor b) verhouding richting 05/11 t.o.v. 02 (de zijrichtingen zijn dus gelijk belast);
- factor c) verhouding rechtsaf t.o.v. rechtdoor, deze geldt voor elke aanvoertak;
- factor d) verhouding linksaf t.o.v. rechtdoor, deze geldt voor elke aanvoertak.



Figuur 5.6-1 Basisconfiguraties viertakskruispunt en turboplein gebruikt in de prestatievergelijking met richtingnummering

Gebleken is – wat ook te verwachten is –, dat factor c) 'rechtsaf t.o.v. rechtdoor' nauwelijks invloed heeft op de capaciteitsvergelijking. Daarentegen is factor d) wel sterk bepalend voor zowel het functioneren van een viertakskruispunt als van een turboplein. Voor de combinatie van de factoren a) en b) is een achttal varianten gekozen, die zijn weergegeven met de letters A t/m H, waarvoor steeds de factor d) is gevarieerd van 0,2 t/m 2. In het rekenproces zijn de belastingen steeds in stappen verhoogd totdat het criterium voor de maximum cyclustijd (120 s) of het vollopen van de opstelruimte op het plein is bereikt. Zo zijn 80 varianten doorgerekend (zie Bijlage G, figuren G.4-2 t/m G.4-9).

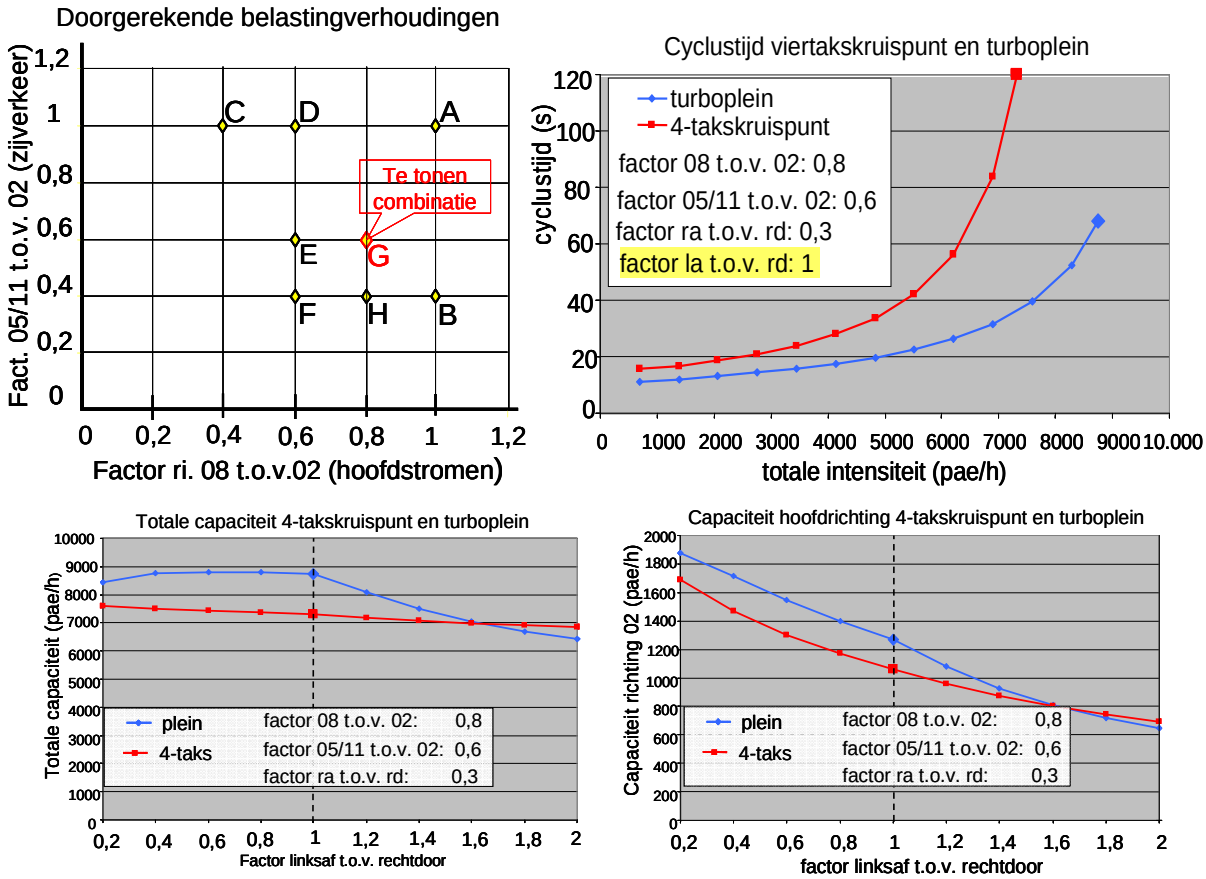
Voor één combinatie (variant G) van de factoren a) en b) is in de tweede rij grafieken van Figuur 5.6-2 het verloop van de totale capaciteit en die van de hoofdstroom in beeld gebracht bij variatie van de verhouding tussen linksaf en rechtdoor (voor zowel het viertakskruispunt als het turboplein). Het verloop van de cyclustijd bij toename van de hoeveelheid verkeer is voor diezelfde variant in beeld gebracht bij evenveel linksafslaand en rechtdoorgaand verkeer (Figuur 5.6-2, rechts boven).

Uit deze berekeningen is een drietal belangrijke conclusies te trekken[171]:

- Zolang de hoeveelheid linksafslaand verkeer kleiner is dan 130 % van het rechtdoorgaande verkeer, is de capaciteit van een turboplein met een diameter van ca. 100 m in alle gevallen groter dan van een viertakskruispunt. In de getoonde variant van Figuur 5.6-2 geldt dat zolang de factor d) 'linksaf t.o.v. rechtdoor' kleiner is dan 1,6. Maar bij een zeer evenwichtig verdeeld belastingpatroon (variant A) treedt dat omslagpunt pas op wanneer de hoeveelheid linksafslaand verkeer tweemaal zo hoog is.

[171] In de TNO-studie met de titel *Evaluatie geregelde turbopleinen* (Horst, van der, et al, 2008) is ook aandacht besteed aan de verkeersafwikkeling. Die is vergeleken met een viertakskruispunt, dat qua verkeersbelastingen en rijstrookindeling enigszins vergelijkbaar is met het Doenkadeplein. Geconstateerd is, dat op het turboplein de cyclustijd 40 - 45 seconde korter (- 47%), de gemiddelde wachttijd 7 seconde korter (- 41 %) en de maximale wachtrij op het turboplein 6 voertuigen korter (-39%) was. Deze bevindingen stemmen goed overeen met een verschil in cyclustijd die bij hoge belastingen meer dan een factor 2 kan zijn.

- De cyclustijd waarbij een hogere capaciteit op het turboplein wordt bereikt, is altijd korter dan die van het viertakskruispunt. Naarmate het aandeel linksafslaand verkeer tot bovengenoemde grens toeneemt, wordt de winst in cyclustijd groter. In het voorbeeld van Figuur 5.6-2 wordt de capaciteit van ca 8800 pae/h op het turboplein bereikt bij een cyclustijd van 66 seconde, terwijl bij een cyclustijd van 120 seconde de capaciteit van het viertakskruispunt ca. 7300 pae/h bedraagt.
- De cyclustijd van een plein is vooral gunstiger bij zware belastingen. In de grafiek van Figuur 5.6-2 levert bij een belasting kleiner dan ca. 5500 pae/h een plein wel cyclustijdwinst op, maar het verschil is niet groot. Pas in het gebied boven 5500 pae/h is de winst in cyclustijd van een plein aanzienlijk (factor > 2).



Figuur 5.6-2 Vergelijking verkeerprestatie viertakskruispunt en turboplein

5.7 Conclusies

In dit hoofdstuk is onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van de combinatie van verkeerslichten en rotondes c.q. verkeerspleinen. Algemeen kan worden geconcludeerd, dat verkeerslichten pas meerwaarde krijgen op toeritten met meer dan één strook. Maar ook op tweestrooksrotondes met een kleine diameter biedt een volledige verkeersregeling nauwelijks een verbetering van de capaciteit. Wel zijn er mogelijkheden om met behulp van rotonde-doseerlichten een substantiële verbetering van de verkeersafwikkeling op turborotondes te bereiken. Theoretisch is voor de linker toeritstrook van de zijtak van een turborotonde een

capaciteitswinst van 86 % berekend; in de praktijk kan 15 à 50 % gerealiseerd worden, doordat verkeer vanaf andere takken de effectiviteit van een RDI vermindert.

Op verkeerspleinen met meer dan twee stroken zijn verkeerslichten een voorwaarde voor een goede verkeersafwikkeling. Uit historisch onderzoek is gebleken, dat een tweefaseregeling de geometrische eigenschappen van een plein voor een vlotte verkeersafwikkeling beter benut dan een vierfaseregeling.

Een tweefaseregeling vraagt om voldoende opstelruimte voor linksafslaand verkeer. De traditionele verkeerspleinen met tangentieel aansluitende aan- en afvoertakken schieten hierin om twee redenen tekort: de kruisingsvlakken vergen relatief veel oppervlak, zodat er betrekkelijk weinig opstelruimte overblijft, terwijl veelal – door de strookindeling op het plein– een linksafslaande verkeersstroom de rechtdoorgaande blokkeert. Als alternatief hiervoor is door de auteur het turboplein ontwikkeld, dat zich door de volgende elementen kenmerkt:

- de aanvoertakken sluiten radiaal aan;
- de afvoertakken verlaten direct achter aanvoertakken het plein tangentieel;
- de rijstroken zijn richtingspecifiek.

Een kritische succesfactor voor het gebruik van het turboplein is de mate waarin bestuurders in staat zijn voor de nadering van het plein de juiste rijstrook te kiezen. Besliswijzers op portaal, voorzien van pijlen gebaseerd op het rotondesymbool bieden hiervoor goede informatie. Wat qua verkeersafwikkeling het sterke punt is van het turboplein – korte cyclustijden met als gevolg korte wachtrijen – is qua gebruiksgemak een zwak punt: de opstelvakken kunnen zo kort zijn, dat er geen ruimte is voor twee portalen met besliswegwijzers achter elkaar, die voor een voldoend duidelijke en overzichtelijke wegsituatie wel noodzakelijk zijn.
Om de weggebruikers al vóór de voorsorteervakken voor te bereiden op het kiezen van de juiste voorsorteerstrook, is een nieuwe voorwegwijzer ontwikkeld waarvan verschillende alternatieven in een onderzoek van beperkte opzet op effectiviteit zijn getoetst. Op tweestrooks aanvoertakken kunnen daarbij ook wegdekpijlen (in de vorm van rotondepijlen) over een lengte van 180 m vóór het begin van de eigenlijke voorsorteervakken, de rijstrookkeuze verbeteren.

In vergelijking met een viertakskruispunt is een verbetering van de totale capaciteit met 1500 pae/h (van 7000 pae/h tot 8500 pae/h) gecombineerd met een reductie van de cyclustijd van 120 tot 60 à 80 seconde geen uitzondering.

6 Veiligheid en beleving

In het kader van dit proefschrift is door de auteur geen afzonderlijk onderzoek verricht naar de veiligheid en beleving van turborotondes en turbopleinen. De belangrijkste reden hiervoor is de noodzaak de omvang van deze studie in te perken. Daarnaast zijn de volgende overwegingen te noemen:

- naar de veiligheid van de turborotonde heeft de auteur eerder studie gedaan in samenhang met de effecten van de aanleg van enkelstrooksrotondes (Fortuijn, 2005b). Die studie levert inzichten op, die thans moeilijk met een onderzoek naar uitsluitend de effecten van de aanleg van turborotondes te achterhalen zijn[172];
- omdat er tot nu toe slechts twee turbopleinen zijn gerealiseerd, zijn er te weinig ongevallengegevens beschikbaar om conclusies te kunnen trekken die meer inhouden dan een vermoeden;
- in 2000 is in het kader van de opening van de eerste turborotonde – de turbo-kluifrotonde Coldenhove – een belevingsonderzoek gehouden, dat een indicatie geeft van de wijze waarop gebruikers die rotonde direct na opening als nieuw fenomeen ervoeren;
- in 2008 is door TNO een evaluatiestudie verricht voor de twee turbopleinen die door Zuid-Holland zijn aangelegd.

In dit hoofdstuk worden genoemde onderzoeken c.q. gegevens achtereenvolgens behandeld[173].

[172] Daarnaast is er ook nog sprake van het probleem van de sterk teruglopende registratiegraad van ongevallen. Daardoor is de kans op vertekening per punt sterk toegenomen.

[173] Ter beperking van de omvang van dit proefschrift is er voor gekozen af te zien van andere beoordelingsaspecten, zoals ruimtebeslag, investerings- en onderhoudskosten en milieuaspecten. De motivering van de gemaakte keuze is tweeërlei. Enerzijds kunnen verkeersafwikkeling, veiligheid en beleving worden aangemerkt als de meest gebruikergerelateerde aspecten. Anderzijds is de rol die de andere aspecten spelen, zoals het ruimtegebruik, de emissie en de geluidbelasting zeer sterk situatiegebonden.

6.1 Veiligheidsonderzoek algemeen

In de literatuur worden verschillende benaderingen beschreven om uitspraken te kunnen doen over het verschil in veiligheid tussen verschillende verkeersoplossingen. De meest bekende zijn:

a) Ongevallen gerelateerd aan een expositiemaat; voor wegvakken wordt daarvoor de voertuigkilometerprestatie gehanteerd en voor kruispunten het aantal voertuigen dat de kruising per dag oprijdt.
b) Ongevallenvoorspellingsmodellen die ongevallen relateren aan verkeersintensiteiten en een set van (te onderzoeken) kruispuntkenmerken.
c) Voor-en-nastudies.

Ad a) Enerzijds is dit een voor de hand liggende benadering. Steeds weer blijkt uit onderzoek, dat de verkeersprestatie de belangrijkste bepalende factor is voor het aantal ongevallen. Daarmee wordt dan rekening gehouden door het aantal (letsel)ongevallen te delen door het aantal voertuigen dat per jaar passeert. Daarbij treden echter twee moeilijkheden op:

– de intensiteitsverhoudingen tussen de aansluitende takken zijn van grote invloed op de gevonden waarden;
– de variatie in de hoeveelheid langzaam verkeer per kruispunt kan in Nederland niet buiten beschouwing blijven.

Het laatstgenoemde aspect spreekt voor zichzelf. Het aantal overstekende fietsers varieert sterk per kruispunt. De auteur heeft voor wat betreft het eerstgenoemde aspect, gebruikmakend van onderzoeksmateriaal van S.T.M.C. Janssen van de SWOV, aandacht gevraagd (Fortuijn, 1995b).

Ad b) In het buitenland worden ongevalllenvoorspelmodellen in allerlei vormen toegepast. Veelal worden modellen gebruikt waarin de elkaar conflicterende verkeersstromen voorkomen met exponenten als modelparameters. Bijvoorbeeld een model dat in de VS is geschat voor slachtofferongevallen op een rotondetoerit (TRB, 2007, p.28) luidt (met aanbevolen parameters):

$$SLO_E \,/\, jaar = exp(-7,2158) \cdot Q_E^{0,7018} \cdot Q_R^{0,1321} \cdot \exp\,(0,511w - 0,0276\theta) \qquad (6.1)$$

Hierin is[174]:

SLO_E /jaar : het aantal letselongevallen per jaar op rotondetoerit E
Q_E : toeritintensiteit [mvt/dag]
Q_R : rotonde-intensiteit tegen de betreffende toerit [mvt/etmaal].
w : toeritbreedte [feet]
θ : hoek tot de volgende tak [graden].

Dit modeltype wordt veel gebruikt om in breed opgezette onderzoeken de invloed van bepaalde ontwerpkenmerken te achterhalen[175].

[174] In de verklarende variabelen w en θ zijn factoren die van invloed zijn op de doorrijsnelheid van de conflicterende partijen, te herkennen.
[175] Een dergelijk model heeft bijvoorbeeld ook ten grondslag gelegen aan CROW-publicatie 115 (CROW1997).

Ad c) Het toepassen van een voor-en-nastudie heeft als voordeel dat de (grote en tegelijkertijd complexe) invloed van de omvang van de verkeersstromen in belangrijke mate wordt geëlimineerd. Voor toepassing van deze methode is het nodig om gedurende een reeks van jaren punten in de ontwikkeling van ongevallen te volgen. Wegbeheerders zijn daartoe goed in staat, omdat zij op de hoogte zijn van het tijdstip van de wijziging. Wel moet worden bedacht, dat de invloed van verkeersintensiteiten – ook als ze in de voor- en nasituatie geheel gelijk zijn – toch niet geheel buiten beschouwing kan blijven: op punten met lage verkeersintensiteiten is de te verwachten veiligheidswinst van de vervanging van een traditioneel kruispunt door een rotonde kleiner[176].
Bij toepassing van deze methode vormen drie zaken een theoretisch probleem voor een goede interpretatie van de cijfers:

1) effect van de prioritering van de maatregelen: verschil in *gevaarzetting*;
2) *regressie naar het gemiddelde* (Hauer, 1997);
3) *algemene veiligheidsontwikkeling*.

De auteur heeft in de studie naar de veiligheidseffecten van de aanleg van enkelstrooks-rotondes en turborotondes in 2005 gekozen voor de methode van voor-en-nastudie.

6.2 Invloed van rotonde-detaillering en fietsoplossing op de veiligheid

Wanneer resultaten van verschillende (internationale) studies met elkaar vergeleken worden, is het verschil in gemeten effecten van de aanleg van rotondes opvallend. Vergelijking van de gegevens uit Tabel 6.2.1 en Tabel 6.2.2 geeft een indruk van de variatie in resultaten.

De oorzaak van deze verschillen moet in twee richtingen worden gezocht:

a) verschillen in onderzoeksperiode c.q. -methodiek;
b) verschillen in het ontwerp.

Op de verschillen ad a) wordt nader ingegaan in paragraaf 6.3. In deze paragraaf wordt aandacht besteed aan mogelijke oorzaken in het ontwerp van de rotonde en de voorrangsregeling voor fietsers. Zoals al is gevonden in Maycock & Hall (1984) is de deflectie van de doorrijcurve (zie Bijlage D.3) de belangrijkste verklarende factor voor de veiligheidsverschillen tussen rotondes. Dit aspect wordt weliswaar algemeen in de verschillende nationale rotonderichtlijnen gememoreerd, maar in de ontwerpaanbevelingen komen grote verschillen in de resulterende doorrijsnelheden voor[177]. Grote verschillen in resulterende veiligheidscijfers zijn dan te verwachten, vooral als ook fietsverkeer daarin een een rol speelt. In Nederland wordt consequent gekozen voor radiaal aansluitende takken,

[176] Immers, in het geval dat er heel weinig zijverkeer is, is de kans op een tweezijdig ongeval gering. Terwijl op een traditioneel kruispunt het risico op een eenzijdig ongeval verwaarloosbaar is, kan dat op een rotonde dan doorslaggevend worden (tegenover de afgedwongen snelheidsverlaging staat dan nauwelijks meer de veiligheidswinst die er bij meer zijverkeer wel is).

[177] De achtergrond hiervan wordt geïllustreerd met het volgende citaat uit een mail (d.d. 30-1-2012) van een collega uit een Zuid-Europees land: ‘Your comments about speeds are pertinent. However, if we force radical changes we risk population rejection and we will try to make a compromise solution, forcing significant reduction of speeds but still offering some comfort to circulating drivers, which is one of the main reasons why roundabouts are popular’.

terwijl in Zuid-Europese landen ruim uitgevoerde tangentieel aansluitende takken gebruikelijk zijn.

Tabel 6.2.1 Effect op ongevallen van het ombouwen van kruispunten naar rotondes volgens Elvik et al. (2009) gebaseerd op 39 studies uit diverse landen

Ernst / Rotondetype	Verhouding na- / voorperiode			
	alle ernstige ongevallen	dodelijke ongevallen	ongevallen, met gewonden	uitsluitend materiële schade
Alle rotondes	0,64	0,34	0,54	1,10
Rotondes in rurale gebieden	0,31			
Rotondes in urbane gebieden	0,75			

Tabel 6.2.2 Effect op ongevallen van het ombouwen van kruispunten naar rotondes in enkele Nederlandse onderzoeken

Onderzoek c.q. rotondetype	# locaties	Verhouding na- / voorperiode		
		totaal aantal ongevallen	slachtoffer-ongevallen	(brom)fiets- slachtoffer-ongevallen
Van Minnen 1995 Alle rotondes	178	0,49	0,24	0,45
Van Minnen 1995 Rotondes met fietspad (fietsers uit de voorrang)	57	0,43	0,09	0,09
Provinciale wegen Zuid-Holland (1989-1999)	27	0,50	0,19	0,17
Churchill, Stipdonk en Bijleveld (2010)	2591	Verhouding na- / voorperiode ernstige slachtofferongevallen		
		0,54		

Maar verschillen tussen de landen zijn niet de enige bron van verschillen in resultaten. In het handboek van Elvik et al. (2009) valt het verschil tussen landelijk en stedelijk gebied op (zie Tabel 6.2.1), terwijl in Nederland het grote verschil tussen de resultaten uit de studie van Van Minnen (1995) en Zuid-Holland (presentatie Fortuijn, 2003c) enerzijds en de studie van Churchill et al. (2010) anderzijds opvalt (zie Tabel 6.2.2). Afgezien van verschillen in onderzoeksmethodiek en de periode waarop de onderzoeken betrekking hebben, is hieraan ongetwijfeld het verschil in de oplossing voor fietsers binnen de bebouwde kom debet. Tabel D.6.3 in de bijlage laat de invloed van de gekozen fietsoplossing op de veiligheid voor fietsers zien: de uitkomsten wijzen sterk in de richting, dat de oplossing met fietsers in de voorrang vooral voor de fietsers zelf onveilig is. Overigens lijkt het erop dat de voorrangsregeling wel een noodzakelijke maar niet voldoende voorwaarde is voor de veiligheid van fietsers nabij rotondes. Ook de vormgeving van de fietsoversteken (uitbuiging van het fietspad) verdient de nodige aandacht (zie verder Bijlage D.6.2 en figuur D.6-7).

6.3 Correctiefactoren voor voor-en-nastudies

6.3.1 Effect verschil in gevaarzetting

Rekening moet worden gehouden met het feit, dat kruispunten met een structureel hoger aantal (letsel)ongevallen het eerst in aanmerking komen voor een aanpassing.[178] Althans de provincie Zuid-Holland –en niet alleen die provincie– maakte in de jaren '90 gebruik van een prioriteringsysteem waarin rekening werd gehouden met het te verwachten veiligheidseffect (PZH, 1994-2003). Het mogelijk effect hiervan wordt in het vervolg kort aangeduid als het effect van de '*afnemende gevaarzetting'*[179].

De analyse hiernaar kon worden uitgevoerd voor enkelstrooksrotondes. In Tabel 6.3.1 zijn per rij de locaties in twee groepen verdeeld, waarbij de scheiding tussen de groepen steeds in een ander jaar van aanleg is gelegd. In de voorlaatste kolom is het bedoelde beleid in grote lijnen inderdaad terug te zien: behoudens 1994 geldt, dat hoe later in de tijd de cesuur wordt gelegd, hoe kleiner het aantal slachtofferongevallen in de eerste groep is[180].

Tabel 6.3.1 Variatie in gevaarzetting naar jaar van aanleg[181]

Verdeling van de rotondes naar jaar van aanleg; zonder de uitschieter in 1994				
Laatste jaar van de eerste periode	Aantallen rotondes		Gemiddeld aantal slachtofferongevallen (over 3 jaar) per kruispunt per jaar vóór aanleg van de rotonde	
	Aantal rotondes aangelegd t/m genoemd jaar	Aantal rotondes aangelegd na genoemd jaar	Eerste groep SLO/ kruispuntjaar vóórsituatie	Tweede groep SLO/kruispuntjaar vóórsituatie
1993	8	30	1,61	1,04
1994	9	29	1,81	0,98
1995	12	26	1,53	0,99
1996	17	21	1,33	1

In het vervolg van het onderzoek is de scheiding tussen de twee groepen bij de jaarovergang 1994/1995 gelegd. In Tabel 6.3.2 blijkt, dat het reductiepercentage van het aantal slachtofferongevallen van de eerste groep enkelstrooksrotondes die vóór 1995 zijn aangelegd, boven de 90 % ligt. Voor de voorrangskruispunten die in latere jaren door een enkelstrooksrotonde zijn vervangen ligt het reductiepercentage rond de 70 % (Tabel 6.3.3).

Voor turborotondes was een dergelijke analyse niet uit te voeren, omdat de gegevensreeks zich over slechts vier jaren uitstrekte (2000 t/m 2003) [182]. Rond 2008 is de registratiegraad van de verkeerongevallen en de kwaliteit van de registratie zodanig afgenomen, dat

[178] In de literatuur is de auteur dit aspect niet tegengekomen.

[179] Met *gevaarzetting* wordt de blootstelling aan gevaar aangeduid, hier uitgedrukt in het niveau van (letsel)ongevallen door zowel het (hogere) risico als de (hogere) verkeersprestatie, die in principe niet toevallig maar voor een kruispunt structureel van aard zijn.

[180] Doordat het aantal rotondes in de eerste groep kleiner is, is het effect van de keuze van het jaar waar de cesuur wordt gelegd, voor de eerste groep veel groter dan voor de tweede.

[181] In deze en volgende tabellen is een uitschieter uit het jaar 1994 verwijderd.

[182] De kluifrotonde Coldenhove is weliswaar in 1999 gerealiseerd, maar komt door zijn afwijkende vorm niet in aanmerking in deze analyse opgenomen te worden (de noordwestelijk lob heeft een relatief grote diameter terwijl de baanscheiding daar niet overrijdbaar is).

wegbeheerders die gegevens niet meer als valide beschouwen om daarop hun verkeersveiligheidsbeleid te baseren, met als gevolg dat ook historische ongevallengegevens bij de provincie Zuid-Holland niet meer eenvoudig toegankelijk zijn. Het inzicht verkregen bij de analyse van de afname in gevaarzetting bij enkelstrooksrotondes is daarom van groot belang bij toepassing van de resultaten verkregen uit een voor-en-na-analyse bij enkelstrooksrotondes.

Tabel 6.3.2 Veiligheidseffect van het vervangen van voorrangskruispunten door enkelstrooksrotondes die in de periode 1991 t/m 1994 zijn aangelegd

Voorrangskruispunt → rotonde1991-1994 (Aantal =9)	Kruispunt-waarneem-jaren	Slachtofferongevallen per kruispuntjaar c.q. rotondejaar	Totaal ongevallen per kruispuntjaar c.q. rotondejaar
Voor-periode (3 jaar*)	21	1,81 per kruispuntjaar	7,00
Na-periode (3 jaar)	27	0,15 per rotondejaar	3,19
Veiligheidseffect		- 91,8%	- 54 %
χ^2-toets op verschil voor en na		37,3	35,4
Significantieniveau		Zeer sterk significant verschil	Zeer sterk significant verschil

* Vóór-periode is 3 jaar, indien beschikbaar.

Tabel 6.3.3 Veiligheidseffect van het vervangen van voorrangskruispunten door enkelstrooksrotondes die in de periode 1995 t/m 2002 zijn aangelegd

Voorrangskruispunt → rotonde1995-2002 (Aantal =29)	Kruispunt-waarneem-jaren	Slachtofferongevallen per kruispuntjaar c.q. rotondejaar	Totaal ongevallen per kruispuntjaar c.q. rotondejaar
Voor-periode (3 jaar)	87	0,98 per kruispuntjaar	3,86
Na-periode (3 jaar*)	84	0,26 per rotondejaar	2,06
Veiligheidseffect		-73,2%	- 46,7%
χ^2-toets op verschil voor en na		34,9	46,7
Significantieniveau		Zeer sterk significant verschil	Zeer sterk significant verschil

* Na-periode is 3 jaar, indien beschikbaar.

De beschikbare ongevallengegevens bij enkelstrooksrotondes maken het ook mogelijk een ander aspect van verschil in gevaarzetting te onderzoeken. In paragraaf 6.1 ad c) is verondersteld dat bij kleine aantallen ongevallen in de voorsituatie het te verwachten *relatieve* effect van de aanleg van rotondes gering zal zijn. Om dit te checken zijn punten steeds gegroepeerd naar aantallen slachtofferongevallen in de vóórsituatie. Daaruit zijn de volgende conclusies getrokken:

- Bij ombouw van een voorrangskruispunt tot enkelstrooksrotonde bedraagt de reductie van het aantal slachtofferongevallen rond de 70 %, zolang het aantal slachtofferongevallen in de vóórsituatie groter is dan 0,5 per jaar.
- Bij een kleiner aantal slachtofferongevallen dan 0,5 per jaar, lijkt de ‘restonveiligheid’ een snel groter wordende invloed te krijgen.
- Bij ca. 0,35 slachtofferongevallen per jaar in de vóórsituatie is de reductie van het aantal slachtofferongevallen nog maar 50%.
- Onder een grens van 0,15 slachtofferongevallen per jaar treedt er nauwelijks meer een positief effect van de aanleg van rotondes op de veiligheid op.

Uiteraard dragen deze conclusies een zeer globaal karakter, gebaseerd op slechts één dataset. Deze gegevens wijzen inderdaad in de richting dat bij een afnemende gevaarzetting het

relatieve effect van de aanleg van een rotonde kleiner is. Helaas ontbreekt informatie over verschillen in expositiemaat, waardoor het mogelijk zou zijn ook het verband met de intensiteit(verdeling) te betrekken. Wel zijn er uit andere bron aanwijzingen, dat bij lage verkeersbelastingen de bijdrage van rotondes aan de verkeersveiligheid kleiner is dan bij hogere verkeersbelastingen (Janssen, 2004, Afb. 6.2: rotondes versus gelijkwaardige kruispunten).

6.3.2 Regressie naar het gemiddelde

De volgorde in het vervangen van kruispunten door rotondes wordt niet alleen beïnvloed door een verschil in aantallen slachtoffers dat structureel van aard is (afnemende gevaarzetting), maar ook door toevallige factoren. Kruispunten met een toevallig verhoogd aantal letselongevallen hebben een verhoogde kans om in aanmerking te komen voor een veiligheidsmaatregel. Op die plaats lijkt zo'n maatregel dan een groter effect te hebben dan in werkelijkheid het geval is. Immers ook zonder die maatregel zou het aantal ongevallen al zijn gedaald. Het gevolg hiervan is, dat later op andere plaatsen tegenvallende reductiecijfers worden waargenomen. Dit wordt algemeen aangeduid als *regressie naar het gemiddelde* (Hauer, 1997). Statistisch kan dit verschijnsel worden benaderd door in kaart te brengen in hoeverre de ongevallenontwikkeling in de jaren direct voorafgaand aan de maatregel afwijkt van een trendlijn van te kiezen referentiepunten.

In genoemde studie (Fortuijn, 2005b) is voor een andere aanpak gekozen, uitgaande van het feit dat het tijdsverloop tussen de beslissing tot bouw van een rotonde en de realisering daarvan meer dan één à twee jaar bedraagt. Dat betekent dat de ongevallencijfers van één of mogelijk twee jaar direct voorafgaand aan het jaar van realisatie geen invloed meer hebben gehad op de beslissing tot realisatie. Duidelijk is, dat het laatste jaar vóór de aanleg in alle gevallen een lager totaal aantal slachtofferongevallen kent dan het tweede en derde jaar (Tabel 6.3.4).

Tabel 6.3.4 Invloed van de vóórperiode waarover wordt gemiddeld

Vóór-periode	Gemiddeld jaarlijks aantal slachtofferongevallen voorperiode					
	Alle rotondes	Enkel-strooks totaal	Voorrangskspnt → Enkelstrooks	Voorrangskspnt → Enkelstrooks vóór 1995	Voorrangskrspnt → Enkelstrooks vanaf 1995	Turborotondes
1jr	0,98	0,88	1,03	1,90	0,72	2,14
2jr	1,13	1,02	1,14	2,11	0,84	2,71
3jr	1,21	1,12	1,24	2,21	0,98	2,43
4jr	1,15	1,06	1,17	2,15	0,95	2,25
5jr	1,10	0,98	1,09	-	0,90	2,03
6jr	1,06	0,95	1,05	-	0,88	1,88
7jr	1,03	0,91	1,01	-	0,85	1,88

Om een indruk te krijgen van de grootte van de getallen waarop deze gegevens zijn gebaseerd, zijn in Tabel 6.3.5 ook de totalen weergegeven. Aantallen onder de 20 à 30 worden over het algemeen te klein om betrouwbare uitspraken op te kunnen baseren. Dit betekent dat in verhoudingsgetallen, gebaseerd op de laatste drie kolommen van Tabel 6.3.4 grote spreidingen kunnen optreden.

Tabel 6.3.5 Totaal aantal slachtofferongevallen, afhankelijk van de lengte van de vóórperiode

Vóór-periode	Aantal slachtofferongevallen voorperiode					
	Alle rotondes	Enkel-strooks totaal	Voorrangskspnt → Enkelstrooks	Voorrangskspnt → Enkelstrooks vóór 1995	Voorrangskrspnt → Enkelstrooks vanaf 1995	Turborotonde
1jr	59	45	40	19	21	15
2jr	133	102	87	38	49	38
3jr	235	164	138	53	85	51

Uit het voorgaande zijn de volgende conclusies te trekken:

- Als correctiefactor voor ‘regressie naar het gemiddelde’voor het aantal slachtoffer-ongevallen in de vóórperiode kan globaal een factor 0,98/1,23= 0,83 worden gehanteerd wanneer het gaat om het vervangen van voorrangskruispunten door enkelstrooksrotondes.
- Bij turborotondes is het getal voor één jaar te klein om dat te kunnen gebruiken voor het bepalen van een correctiefactor voor ‘regressie naar het gemiddelde’. Voorlopig kan – voorzichtigheidshalve – daarvoor hetzelfde getal worden aangehouden als voor het vervangen van voorrangskruispunten door enkelstrooksrotondes.

6.3.3 Correctie voor algemene veiligheidsontwikkeling

Daling van het aantal (letsel)ongevallen is niet alleen het gevolg van de getroffen maatregel en een toevallige variatie in het aantal ongevallen, maar kan mede worden beïnvloed door een algemene daling van het risico, gecombineerd met verandering van de omvang van de verkeersstromen. Deze invloedsfactor wordt in deze studie als ‘*algemene veiligheids-ontwikkeling’* aangeduid. Als maatstaf hiervoor is de ontwikkeling van het aantal slachtofferongevallen op kruispunten waar geen maatregelen zijn getroffen, bruikbaar. Correctieberekeningen kunnen worden uitgevoerd onder de volgende aannamen:

– de ‘algemene veiligheidsontwikkeling’ verklaart voor een deel de wijzingen in de aantallen slachtofferongevallen op de tot rotonde omgebouwde kruispunten;
– de intensiteitontwikkeling op kruispunten die tot rotonde zijn omgebouwd wijken bij benadering niet af van die op kruispunten die niet zijn aangepast;
– de algemene ontwikkeling in het ongevalrisico heeft op de aangepaste kruispunten eenzelfde invloed als op de niet-aangepaste kruispunten.

Steeds zijn de letselongevallen van een periode van drie jaar vóór en drie jaar na het jaar waarin de rotonde is gebouwd met elkaar vergeleken. De correctie voor de algemene veiligheidsontwikkeling is dan gering. Voor de enkelstrooksrotondes die in de periode 1995-2002 zijn aangelegd bedroeg die +0,07% (toename van het gemiddeld aantal) en voor de turborotondes die in de periode 2000-2002 zijn aangelegd bedroeg die -2,4 %.

6.4 Veiligheidseffect van aanleg turborotondes

6.4.1 Beschikbaar cijfermateriaal

Tussen 1999 en 2004 zijn door de provincie Zuid-Holland acht turborotondes in allerlei vormen aangelegd. De turbo-kluifrotonde A20/ N220 (Coldenhove) te Maasland is in het cijfermateriaal buiten beschouwing gelaten omdat de noordwestelijke lob niet de vorm heeft

van een turborotonde. Slechts zeven turborotondes resteren dan voor nadere analyse. Van deze zeven turborotondes in Tabel 6.4.1 is de vóórsituatie niet identiek: vijf voorrangskruispunten, één kruispunt met verkeerslichten en één verkeersplein.

6.4.2 Ongecorrigeerde resultaten

In Tabel 6.4.1 zijn de resultaten weergegeven van de aanleg van zeven turborotondes met in totaal 16 rotondewaarneemjaren (gemiddeld 2,3 waarneemjaar na aanleg). Daaruit kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het reductiepercentage van 82 % voor het aantal letselongevallen is verrassend hoog. Een statistische toets laat zien, dat de afname zeer significant is.
- Duidelijk is, dat de turborotondes zijn aangelegd op punten waarin zowel in de vóór- als in de na-periode de aantallen ongevallen hoger zijn dan bij de enkelstrooksrotondes (zie Tabel 6.3.2 en Tabel 6.3.3). Dit geldt zowel voor alle ongevallen als voor de slachtofferongevallen

Tabel 6.4.1 Veiligheidseffect van het vervangen van kruispunten door turborotondes

Kruispunt → turborotonde (aantal =7)	Kruispunt-waarneem-jaren	Slachtofferongevallen per kruispuntjaar c.q. rotondejaar	Totaal ongevallen per kruispuntjaar c.q. rotondejaar
Voorperiode (3 jaar)	21	2,429 per kruispuntjaar	11,905
Naperiode (2,286 jaar*)	16	0,438 per rotondejaar	6,063
Veiligheidseffect		-82,0 % (± 8%)[183)]	-49,1% (±7%)
X^2-toets op verschil voor en na		22,9	33,05
Significantieniveau		Zeer sterk significant	Zeer sterk significant

* Na-periode is 3 jaar, indien beschikbaar.

Aangenomen mag worden dat de turborotondes – evenals dat het geval was bij de enkelstrooksrotondes – eerst zijn aangelegd op plaatsen met een relatief hoog ongevalrisico. Daarom mag verwacht worden, dat het reductiepercentage van 82 % voor het aantal slachtofferongevallen voor andere locaties waar turborotondes gebouwd gaan worden in de loop van de tijd zal gaan dalen. Voor de komende jaren lijkt een reductiepercentage van 70% een goede aanname. Mogelijk dat dit percentage op den duur nog iets verder zal gaan dalen, als turborotondes ook aangelegd worden op punten met een lager aantal letselongevallen in de vóórperiode.

6.4.3 Gecombineerd effect van de algemene veiligheidsontwikkeling en regressie naar het gemiddelde

Wanneer rekening wordt gehouden met zowel ‘regressie naar het gemiddelde’als algemene veiligheidsontwikkeling leidt dit tot het hanteren van de volgende reductiefactoren op de afname percentages.

---

183 De spreiding van de verhouding tussen de vóór- en nasituatie is bepaald met behulp van simulatieberekeningen. Voor de afname van 82 % van het aantal slachtofferongevallen is een spreiding van 8 % en voor de afname van 49,1 % van het totaal aantal ongevallen is een spreiding van 8 % gevonden (met dank aan H. Botma). Ter vergelijking zijn deze spreidingen ook berekend met formule (6.4). Dit levert iets afwijkende waarden op (7,3 % respectievelijk 6,1 %). Mogelijk houdt dit verband met de introductie van een correctie voor onzuiverheid in formule (6.2) voor de berekening van de

Tabel 6.4.2 Gecorrigeerde reductiepercentages slachtofferongevallen

Maatregel	Afname (3 jaar voor-en-na)	Afname gecorrigeerd voor algemene risico-ontwikkeling	Afname inclusief correctie 'regressie naar het gemiddelde'
Alle kruispunten → enkelstrooksrotonde (51)	- 82,9 %	- 83,7 %	-80,2%
Voorrangskruispunt → enkelstrooksrotonde (39)	- 81,7%	- 82,4 %	-78,7%
Voorrangskruispunt → Enkelstrooksrotonde vanaf 1995 (29)	-73,2%	- 73,7 %	-68,1%
Kruispunt → turborotonde (aantal =7)	- 82,0%	- 80,3 %	-76,1% [184)]

Duidelijk is dat:
- de invloed van de reductie voor de algemene veiligheidsontwikkeling niet groot is;
- de reductie voor 'regressie naar het gemiddelde'een belangrijkere factor is;
- de invloed van de vermindering van de gevaarzetting op de kruispunten waar in de loop van de tijd een rotonde wordt aangelegd het grootst is op de te hanteren reductiefactoren.

Bij het interpreteren van de gevonden cijfers voor turborotondes moet bedacht worden, dat het laatstgenoemde aspect niet voor turborotondes kon worden onderzocht.

6.4.4 Vergelijking met Amerikaans onderzoek

In het kader van het National Cooperative Highway Research Program is door de Transportation Research Board of the National Academies het NCHRP Report 572 *Roundabouts in the United States* in 2007 (TRB, 2007) gepubliceerd. Daarin zijn ook de resultaten van voor-en-na-analyses opgenomen. Gesteld wordt dat in voor-en-na-analyses – via een vergelijking met een referentiegroep – de aantallen gecorrigeerd dienen te worden voor 'regressie naar het gemiddelde'.

Als vergelijkingsmaatstaf wordt de effectiviteitindex (Index of Effectiveness θ) gebruikt, die is bepaald als:

$$\theta = \frac{A_{sum}/B_{sum}}{1 - Var(B_{sum})/B_{sum}^2} \qquad (6.2).$$

Het reductiepercentage (in de tabellen in paragraaf 6.3.1 en 6.4.2 ook als veiligheidseffect aangeduid) is dan gelijk aan:

reductiepercentage = $100\% (1-\theta)$ (6.3).

De variatie van θ wordt berekend met:

effectiviteitindex (waardoor ook de waarden voor het reductiepercentage (veiligheidseffect) iets lager zouden uitkomen (resp 81,6 % en 48,9 %.)

[184] Van de berekening van de correctiefactoren voor het totaal aantal ongevallen is in de studie van 2005 afgezien, omdat het aantal ongevallen met uitsluitend materiële schade (ums) in de prioritering een zeer ondergeschikte rol speelde. Daarbij speelde ook de sterke onderregistratie van ongevallen met uitsluitend materiële schade een rol.

$$Var(\theta) = \theta^2 \cdot \frac{\frac{Var(A_{sum})}{A_{sum}^{\ 2}} + \frac{Var(B_{sum})}{B_{sum}^{\ 2}}}{\left(1 + \frac{Var(B_{sum})}{B_{sum}^{\ 2}}\right)^2} \tag{6.4}$$

Uitgaande van een Poissonproces geldt:

$$Var(A) = A \tag{6.5}$$

Hierin is:

B : het verwachte aantal ongevallen dat zou hebben plaatsgevonden in de naperiode zonder aanpassing van de situatie

A : het aantal ongevallen dat heeft plaatsgevonden in de naperiode

θ : de effectiviteitindex.

In Tabel 6.4.3 zijn de resultaten uit die studie weergeven. Hierbij moet wordt opgemerkt dat voor de correctie voor 'regressie naar het gemiddelde' in de vóórperiode niet de statistische vergelijking met een referentiegroep is gebruikt, maar de aantallen één jaar voor aanleg van de rotonde[185].

Voor de vergelijking met de turborotonde zijn de reductiecijfers voor de elf Amerikaanse tweestrooksrotondes van belang. Op die rotondes was de gemeten reductie van slachtofferongevallen 71,8 %. Dat is iets lager dan de 76,1% die in Tabel 6.4.2 is berekend als afnamepercentage voor turborotondes. Hoewel de berekende reductie van het aantal slachtofferongevallen op turborotondes iets groter is dan die op de Amerikaanse tweestrooksrotondes, laat het beschikbare materiaal niet toe tot een significant verschil te concluderen. Opmerkelijk is de veel kleinere reductie van het aantal ongevallen met uitsluitend materiële schade op de Amerikaanse tweestrooksrotondes in vergelijking met die op de turborotondes: afname van het totaal aantal ongevallen met 17,9% (spreiding 8,2 %) versus 49,1 % (weliswaar ongecorrigeerd voor een eventuele 'regressie naar het gemiddelde'en algemene risico ontwikkeling[186]). Dit is een aanwijzing, dat het aantal ongevallen met uitsluitend materiële schade op concentrische tweestrooksrotondes groter is dan op turborotondes.

[185] Verrassend is, dat dit dus dezelfde benadering is die de auteur heeft gebruikt. In genoemde studie is de uitkomst van deze benadering vergeleken met een analyse van jaarlijkse trends, die een aanwijzing vormt dat de gevolgde benadering juist is.

[186] Omdat de ongevallen met uitsluitend materiële schade geen rol speelden in de prioritering, is het aannemelijk dat de correctie voor 'regressie naar het gemiddelde'nauwelijks een rol speelt in het bepalen van een correctiefactor voor dat deel van de ongevallen. Wanneer verder voor de algemene risico-ontwikkeling dezelfde correctiefactor wordt toegepast als voor de slachtofferongevallen, en bij de berekening ook gebruik wordt gemaakt van formule (6.2), wordt voor het totaal aantal ongevallen een reductiepercentage van 35,6 % gevonden en voor de spreiding 7,7 % bij toepassing van formule (6.4), in plaats van de 49,1 % en 7% die zijn vermeld in Tabel 6.4.1.

Tabel 6.4.3 Resultaten uit een Amerikaans vóór-en-na-onderzoek *(TRB,2007, Table 28)*

Control Before	Sites	Setting	Lanes	Crashes recorded in after period		EB estimate of crashes expected without roundabouts		Index of Effectiveness θ (standard error) & Point Estimate of the Percentage Reduction in Crashes	
				All	Injury	All	Injury	All	Injury
All Sites	55	All	All	726	72	1122.0	296.1	0.646 (0.034) 35.4%	0.242 (0.032) 75.8%
Signalized	9	All	All	215	16	410.0	70.0	0.522 (0.049) 47.8%	0.223 (0.060) 77.7%
	4	Suburban	2	98	2	292.2	Too few	0.333 (0.044) 66.7%	Too few to estimate
	5	Urban	All	117	14	117.8	34.6	0.986 (0.120) 1.4%	0.399 (0.116) 60.1%
All-Way Stop	10	All	All	93	17	89.2	12.6	1.033 (0.146) -3.3%	1.282 (0.406) -28.2%
Two-Way Stop	36	All	All	418	39	747.6	213.2	0.558 (0.038) 44.2%	0.182 (0.032) 81.8%
	9	Rural	1	71	16	247.7	124.7	0.285 (0.040) 71.5%	0.127 (0.034) 87.3%
	17	Urban	All	102	6	142.7	31.6	0.710 (0.090) 29.0%	0.188 (0.079) 81.2%
	12		1	58	5	93.7	22.5	0.612 (0.101) 39.8%	0.217 (0.100) 80.3%
	5		2	44	1	48.9	Too few	0.884 (0.174) 11.6%	Too few to estimate
	10	Suburban	All	245	17	357.2	57.0	0.682 (0.067) 31.8%	0.290 (0.083) 71.0%
	4		1	17	5	77.1	21.8	0.218 (0.057) 78.2%	0.224 (0.104) 77.6%
	6		2	228	12	280.1	35.2	0.807 (0.091) 19.3%	0.320 (0.116) 68.0%
	27	Urban/ Suburban	All	347	23	499.9	88.6	0.692 (0.055) 30.8%	0.256 (0.060) 74.4%
	16		1	75	10	162.8	44.3	0.437 (0.060) 56.3%	0.223 (0.074) 77.7%
	11		2	272	13	329.0	44.3	0.821 (0.082) 17.9%	0.282 (0.093) 71.8%

6.5 Verkeersveiligheid turbopleinen

Van slechts één turboplein – het Doenkadeplein te Rotterdam – kunnen de ongevallen in de voor- en naperiode met elkaar vergeleken worden. In de voorsituatie was dit een T-aansluiting van de N471 op de N209, geregeld met verkeerslichten. Na doortrekking van de N471 is dit een turboplein met vier aansluitende takken geworden.

Ondanks de uitbreiding met een extra tak (en toename van de hoeveelheid verkeer) is het aantal ongevallen per jaar na realisatie van het turboplein lager (Tabel 6.5.1). Ook is het patroon onderscheiden naar de ernst van de ongevallen in overeenstemming met de verwachting. Maar door de geringe aantallen zijn de verschillen niet significant, zodat geen harde conclusie over de veiligheid van het turboplein getrokken kan worden.

Tabel 6.5.1 Ongevallen in voor-en-nasituatie aansluiting N207/N471

Doenkadeplein N207/N471	Voorperiode: T-aansluiting met VRI		Naperiode: Turboplein met 4 takken		*Procentuele afname*	Toets significantie van de afname	
	Totaal 6 jaar	*Per jaar*	Totaal 3 jaar	*Per jaar*		Chi-kwadraat	Significantie-niveau (kans geen afname)
Alle ongevallen	16	*2,67*	6	*2*	*- 25%*	0,36	55%
Slachtofferongevallen	5	*0,83*	1	*0,33*	*- 60%*	0,75	39%
Ernstige ongevallen	2	*0,33*	0	*0,00*	*- 100%*	1,00	32%

Volledigheidshalve zijn ook de ongevallen op het Tolhekplein in beschouwing genomen. Daarvan zijn geen ongevallen in de voorsituatie bekend, terwijl de intensiteit 62% bedraagt van die op het Doenkadeplein. Daarom zijn die ongevallen met een factor 1,6 vermenigvuldigd om ze als een fictieve uitbreiding van de naperiode bij het Doenkadeplein te kunnen betrekken. Dat leidt tot de conclusie, dat met een betrouwbaarheidsniveau van 68 % het aantal ernstige ongevallen afneemt door de aanleg van een turboplein (niet significant terwijl in zeven waarneemjaren geen enkel ernstig letselongeval is geregistreerd).

In ieder geval leveren deze getallen niet de indicatie op, dat een turboplein onveilig zou zijn, zoals door gedragswetenschappers op basis van geconstateerde foutmanoeuvres is vermoed (Horst, van der, e.a. 2008). Het lijkt erop dat in het typeren van 'foutmanoeuvres' als 'onveilig gedrag' door gedragwetenschappers – gelet op de suggestie die daarvan uitgaat ten aanzien van het veiligheidsniveau van een verkeersoplossing uitgedrukt in aantallen verkeersslachtoffers – te weinig rekening wordt gehouden met de snelheden van de potentiële conflictpartners. De aanbeveling om 'terughoudend te zijn in het toepassen van dit type kruispuntvorm' vindt hierin onvoldoende grond[187].

6.6 Belevingsonderzoek

6.6.1 Turbo-kluifrotonde

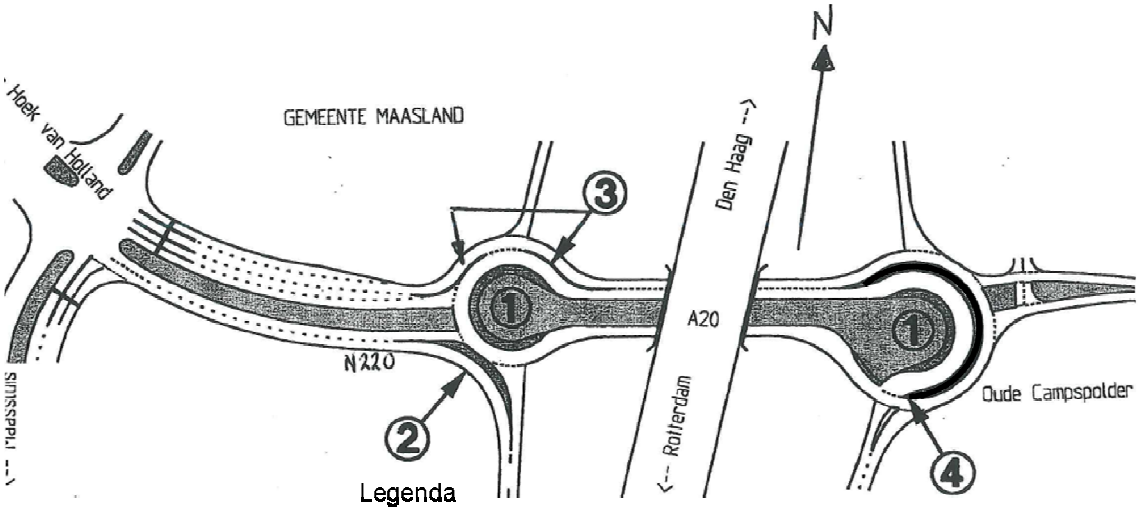
Enquête

In juni 1999 is de rotonde Coldenhove (A20/N220) te Maasland aangelegd. In deze kluifrotonde is voor het eerst een belangrijk element van de turborotonde – de overrijdbaar verhoogde strookscheiding – toegepast. Aan de oostzijde verdeelt een niet-overrijdbare scheiding de rotonde in twee banen (Figuur 6.6-1). In verband met het bijzondere ontwerp is in augustus 1999 een enquête gehouden naar het gebruik van deze rotonde. Immers, op de rotonde zelf kan niet meer van strook worden gewisseld. In de vraagstelling is onderscheid

[187] De zin die daarop volgt: "en toepassing alleen te overwegen als de verkeerscapaciteit bij zware kruisende verkeersstromen dat echt noodzakelijk maakt" vertolkt uiteraard een bijna vanzelfsprekende wijsheid, mits in de afweging ook het veiligheidsaspect van het alternatief wordt betrokken. Een hogere score in een belevingsonderzoek staat niet garant voor een hogere veiligheid.

gemaakt naar het soort voertuig waarmee de rotonde wordt bereden en de frequentie. Gevraagd is naar de duidelijkheid van de situatie, de berijdbaarheid en de wegwijzers. Bovendien konden de antwoorden worden toegelicht terwijl ook ruimte was voor overige opmerkingen.

Op 31 augustus 1999 zijn tussen 9.00 en 11.00 uur enquêteformulieren uitgereikt. De plaats was op het wegvak tussen de rotonde en het kruispunt voor het verkeer komend vanaf de rotonde, opgesteld in westelijke richting voor een rood verkeerslicht. In deze periode zijn 500 formulieren uitgedeeld. Voorts zijn aan circa 90 bedrijven op het bedrijventerrein 10 formulieren per bedrijf toegezonden. Bovendien zijn aan het openbaar vervoerbedrijf Connexxion formulieren toegezonden. In totaal zijn ruim 1400 formulieren uitgezet. Tot aan 20 september zijn 450 formulieren ingevuld ontvangen en verwerkt. Dit is een respons van 32%.



Figuur 6.6-1 Turbo-kluifrotonde Coldenhove

Resultaten

Verdeling over de voertuigen

De voertuigverdeling van de respondenten was als volgt:

Berijders van motoren	3%	3%
Berijders van personenauto's en bestelauto's	76%	80%
Berijders van vrachtwagens (c)	4%	
Berijders van vrachtwagens met oplegger (d)	6%	17%
Berijders van vrachtwagens met aanhanger(e)	3%	
Berijders van bussen (f)		3%
		100%
Berijders van meerdere voertuigen (m)	5%	
	100%	

Op 22 mei 1997 zijn in het ochtendspitsuur en avondspitsuur kruispunttellingen gehouden. Daarin was de voertuigverdeling: motorrijders 1%, personenauto's 83 % en vrachtauto's en bussen 16%. De verdeling in de enquête stemt in grote lijn hiermee overeen. Opvallend is het hoge percentage vrachtauto's.

Passage-frequentie

- 83 % van de respondenten passeert deze rotonde één of meer keren per week;
- 17 % komt er minder dan eenmaal per week.

Dit betekent dat de bekendheid met de situatie binnen een enkele week al zeer groot is.

Niet is nagegaan (via een check op de kentekens) of de woonafstand wellicht van invloed is geweest op de respons. Bij een ondervertegenwoordiging van bestuurders die van verder komen, kan ook de groep van minder frequente passanten ondervertegenwoordigd zijn. Aangezien de groep die minder dan eenmaal per week deze rotonde passeert slechts uit 30 respondenten bestaat, is het niet zinvol om deze verder op te splitsen (wat de enquêteopzet wel toelaat).

Duidelijkheid van de situatie

Gevraagd naar de duidelijkheid van de situatie, zijn de antwoorden als volgt verdeeld:

- 77 % vindt de situatie duidelijk tot zeer duidelijk;
- 15 % aarzelt soms;
- 8 % vindt de situatie verwarrend.

Bij degenen die zelden gebruik maken van de kluifrotonde vindt slechts 63 % de situatie duidelijk tot zeer duidelijk (19 respondenten). Van degenen die er wekelijks of meer gebruik van maken vindt 77,4 % de situatie duidelijk tot zeer duidelijk. Opvallend is dat van deze groep 8 % (34 van de 37 respondenten) de situatie nog altijd als verwarrend beoordeelt. Voor de interpretatie van de betekenis van het antwoord op deze vraag is het interessant te constateren, dat sommige respondenten, die er dagelijks komen, aangeven dat het berijden prettig is en toch de situatie als verwarrend kwalificeren. Dit houdt in dat het antwoord op deze vraag voor sommigen meer een mening (op basis van een eerdere ervaring) dan een (actuele) beleving vertegenwoordigt.

Tabel 6.6.1 Oordeel over duidelijkheid turbo-kluifrotonde Coldenhove

Voertuig / **Duidelijkheid**	personenauto # 341	vrachtauto #62
duidelijk of heel duidelijk	73%	87%
soms aarzelen	18%	2%
verwarrend	9%	11%

Opvallend is, dat bestuurders van grote voertuigen minder vaak aarzelen, waardoor de score voor duidelijk tot zeer duidelijk 88 % bedraagt (Tabel 6.6.1). Onder bestuurders van personenauto's is die score 73%. Vrachtwagenbestuurders vinden de situatie duidelijker dan personenautobestuurders. Dat wordt niet verklaard door het feit dat de vrachtwa-

genrespondenten er frequenter komen (90 % wekelijks of vaker) dan personenauto's.[188] Mogelijk is de mate van overzicht door de zithoogte van invloed op de hogere score.

Berijdbaarheid

Gevraagd naar de berijdbaarheid van de verkeersoplossing, zijn de antwoorden als volgt verdeeld:
- 73% vindt deze prettig berijdbaar;
- 23 % vindt deze matig berijdbaar;
- 4 % vindt deze moeilijk berijdbaar.

Hoe vaker men er komt, hoe prettiger men de situatie vindt. Als men er zelden komt, scoort de kwalificatie prettig 63%.

Het oordeel over berijdbaarheid wisselt onder vrachtwagenbestuurders. Bestuurders van ongelede vrachtauto's vinden de situatie prettiger dan van personenauto's (respectievelijk 85% en 72%), terwijl bestuurders van gelede vrachtauto's de berijdbaarheid minder prettig vinden. Van de motorrijders waardeert zelfs 92% de berijdbaarheid als prettig.

Een mogelijke verklaring hiervoor is, dat door het samenspel van dwarskrachten, voertuighoogte, lengte, enz. sommige voertuigen meer moeten afremmen dan anderen. Het vermoeden bestaat, dat de mate waarin men moet afremmen van invloed is op de mate waarin men de situatie prettig berijdbaar vindt. Vanuit een oogpunt van veiligheid is het ongewenst om de rotondestralen groter te maken. Wel kan bekeken worden of het aanbrengen van overrijdbare rammelstroken in de tangentpunten van de aansluittakken de berijdbaarheid van gelede voertuigen kan verbeteren: 10% geeft aan dat ze de situatie moeilijk berijdbaar vinden.

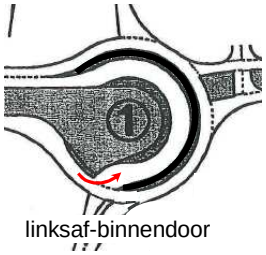
Wegwijzers

Gevraagd naar de duidelijkheid van de wegwijzers, is de verdeling van de antwoorden:
- 85 % vindt de wegwijzers duidelijk;
- 15 % vindt de wegwijzers onduidelijk.

Naar voertuiggebruik treden verschillen op van circa 10%, waarbij het vrachtverkeer positiever is dan personenauto's en bestelauto's. Ondertussen is duidelijk geworden, dat het gebruik van vallende pijlen het minst duidelijk is.

Overige informatie gebruik turborotonde

Naast dit gebruikersonderzoek is ook veel aandacht besteed aan het observeren van het gedrag van de verkeersdeelnemers, zonder dat de resultaten daarvan schriftelijk zijn vastgelegd. Daarbij viel –zeker in het begin– de 'linksaf-binnendoor'manoeuvre vanaf het oosten naar het noorden sterk op (Figuur 6.6-2).



Figuur 6.6-2 Waargenomen foutmanoeuvre op turbo-kluifrotonde Coldenhove

[188] Want dan zou onder de frequent passerende vrachtwagenbestuurders de score voor duidelijkheid niet meer dan 77,4 % bedragen.

Op deze rotonde leidt dat tot het maken van een volledige ronde, twee maal extra onder de rijksweg door. Hoewel deze manoeuvre op de meeste turborotondes niet tot omrijden leidt, is dit voor de auteur aanleiding geweest extra aandacht te besteden aan het beginpunt van de binnenste rotondestrook (zie paragraaf 3.5.5).
Ook bleek uit vele gesprekken met gebruikers dat het tijdig kunnen kiezen van de juiste rijstrook als het meest genoemde punt van kritiek naar voren kwam. Dat heeft geleid tot de introductie van de *strookwisselwegwijzer* als voorwegwijzer (zie paragraaf 3.6.2).

Conclusie gebruik turborotonde

Het principe van strookkeuze op turbo-kluifrotonde Coldenhove wijkt in feite niet af van dat van de meer voorkomende vormen van turborotondes. Qua (on)mogelijkheden van strookwisselen staat deze rotonde model voor de turborotonde. Daarom is ervan afgezien dat onderzoek te herhalen op later gebouwde turborotondes.
Qua overzichtelijkheid is deze rotonde wellicht iets complexer, temeer daar de oostlob is voorzien van een niet-overrijdbare rijbaanscheiding[189]. De score van 73% door personenautobestuurders en 87% door vrachtautobestuurders voor de duidelijkheid van de turbo-kluifrotonde Coldenhove is positief.

6.6.2 Turbopleinen

Zoals hiervoor vermeld, is in 2007 in opdracht van de provincie Zuid-Holland door TNO een onderzoek uitgevoerd naar een aantal aspecten van twee turbopleinen die in 2006 (Doenkadeplein) en 2007 (Tolhekplein, deels) zijn geopend (Horst, Van der, 2008). De gegevens in deze paragraaf zijn aan die studie ontleend.

Wegbeeldanalyses

Vervolgens wordt een verslag gepresenteerd van wegbeeldanalyses door ‘human factor experts’, zoals de gedragswetenschappers in het rapport worden aangeduid. Daarin staan voornamelijk de bewegwijzering en de markering (belijning en wegdekpijlen) centraal. Ten aanzien van de bewegwijzering op de aanvoertakken worden – afgezien van de erg korte afstand tussen het Doenkadeplein tot de turborotonde Hoogendorpweg/ Landscheidingsweg in combinatie met het grote aantal informatie-eenheden (bestemmingen, wegnummers, richtingen)– geen omissies geconstateerd.

Opvallend is dat de experts in de beoordeling van de lay-out uitgaan van de – niet expliciet gemaakte – verwachting van weggebruikers, dat het altijd nog mogelijk moet zijn om op het plein zelf van richting c.q. strook te veranderen, ook al vermelden de pijlen per strook exclusieve richtingen. Opgemerkt wordt bijvoorbeeld (blz. 51): “Als men eenmaal dit portaal (op de aanvoertak) is gepasseerd, is er echter verder geen enkele bewegwijzering meer aanwezig, ook niet bij het verlaten van het plein. In het algemeen geven mensen sterk de voorkeur aan het vinden van een bevestiging van de door hen gemaakte keuze. Deze ontbreekt en kan weggebruikers aan het twijfelen brengen op het plein met als gevolg mogelijk onzeker gedrag.” Tegen die achtergrond wordt aanbevolen op het plein zelf bevestigingsborden te

[189] Doordat deze rotonde qua basisvorm is gebaseerd op de later zo genoemde knierotonde (Figuur 3.4-1), leidt het maken van de meest voorkomende fout hier tot meer discomfort dan op bijvoorbeeld de basis turborotonde.

plaatsen, aangezien nog wel conflictpunten worden gepasseerd waar men illegaal nog van richting kan veranderen[190]. Opgemerkt kan worden dat de gedragsobservaties (zie verderop) inderdaad laten zien dat het van strook wisselen op het plein de grootste bron van foutmanoeuvres is.

Gedragsobservaties

De auteurs van TNO merken op (blz. 58): "Het percentage foutmanoeuvres van voertuigen die tijdens de geanalyseerde periode het Doenkadeplein passeren bedraagt 0,55%. Dat lijkt op zich niet hoog maar 173 foutmanoeuvres over een totaal geanalyseerde periode van in totaal 11 uur is ook zeker niet verwaarloosbaar, gelet op de hoeveelheid verkeer die per uur het plein passeert. Direct vergelijkingsmateriaal met foutmanoeuvres op andere typen kruispunten is niet beschikbaar.." Wel wordt opgemerkt, dat ernstige foutmanoeuvres zoals spookrijden op gewone viertakskruispunt in verhouding minder vaak voorkomen. In de dalperiode (9:30-16:30) blijken 1,9 keer zoveel foutmanoeuvres (gerelateerd aan het aantal voertuigen) voor te komen dan in de spitsperioden (7:30-9:30 en 16:30-18:30). In totaal zijn 2 uur spitswaarnemingen en 7 uur dalperiode waarnemingen nader geanalyseerd (Tabel 6.6.2).

Tabel 6.6.2 Foutmanoeuvres op Doenkadeplein[191] *(Bron: Van der Horst, 2008)*

Vanuit richtig	Linksaf binnendoor; daarna herstel	U-turn: linksaf binnendoor zonder herstel	Complex (rondje) veelal na linksaf binnendoor	RD toch LA LA toch RD of RD toch RA	Voor-sorteren	Overig	Totaal
oosten	30	20	19	3	-	1	73
zuiden	19	6	4	1	3	9	42
westen	2	1	3	2	-	1	9
noorden	29	10	6	2	2	0	49
Totaal	**80**	**37**	**32**	**8**	**5**	**11**	**173**
%	***46,2%***	***21,4%***	***18,5%***	***4,6%***	***2,9%***	***6,4%***	***100,0%***

In het rapport wordt veel aandacht besteed aan de foutmanoeuvres die tot spookrijden leiden. De wegbeheerder heeft het advies opgevolgd om ook voor de toeritstroken voor linksaf rotondeschilden te plaatsen (Figuur 5.5-2). Maar verreweg het grootste aantal foutmanoeuvres (80,4%) treedt eveneens op door verkeer dat op de linksaf voorsorteervakken het turboplein oprijdt, maar dat bij het tweede verkeerslicht (met pijl schuin naar boven) direct bij het eerste te kruisen rijbaan linksaf slaat ('linksaf binnendoor', zie Figuur 5.5-3).

In paragraaf 5.5.2 en 5.5.3 is dankbaar gebruikgemaakt van de gegevens uit Tabel 6.6.2. Dit behelst een verbetering van de bebording en markering op het plein, die meer zijn toegespitst dan de aanbevelingen in het rapport zelf (doorgetrokken strepen naast onderbroken strepen, patroon onderbroken strepen aanpassen, anti-spookrijpijlen aanbrengen). Deze aangescherpte markering is noodzakelijk omdat verkeerdeelnemers:

a) gewend zijn om op oude pleinen van strook te wisselen;

[190] Door de CROWwerkgroep *Bewegwijzering* is dit advies niet overgenomen, omdat getwijfeld wordt aan de mogelijkheid deze zo te plaatsen dat ze op het plein zelf nog functioneel zijn.

[191] Hier worden alleen de cijfers van het Doenkadeplein weergegeven, omdat het Tolhekplein ten tijde van het onderzoek nog niet gereed was.

b) niet op de hoogte zijn RVV-artikel 78 (dat strookwisselen op pleinen verbiedt).

Maar het is niet alleen de onduidelijkheid m.b.t. markering en bebording op het plein zelf, die aanleiding geeft tot manoeuvrefouten. Het volgende onderdeel van genoemd onderzoek geeft daarvoor aanwijzingen.

Ervaringen en belevingen van gebruikers

Onder de gebruikers van het turboplein Doenkadeplein is een uitgebreide enquête gehouden. Opvallende verschillen met de enquête Coldenhove zijn:

- in plaats van het onderscheid tussen alleen de wegsituatie en bewegwijzering zijn vier aspecten onderscheiden: bewegwijzering, voorsorteren, te volgen route en voorrangssituatie;
- naar berijdbaarheid is niet gevraagd;
- in plaats van alleen te vragen naar duidelijkheid zijn duidelijkheid (t.a.v. wat de bestuurder moet doen) en overzichtelijkheid (sluit het aan bij wat wordt verwacht?) onderscheiden;
- er is expliciet gevraagd naar gemaakte vergissingen;
- vergelijking met oude situatie;
- wat zijn de grootste voor-en-nadelen.

Zie voor het formulier zelf Bijlage I3.

Totaal zijn 40 personenautobestuurders ondervraagd en 13 vrachtautobestuurders.

Passage-frequentie

Onder personenautobestuurders ziet het gebruik van het Doenkadeplein er als volgt uit:

- 57,5 % van de respondenten gebruikt het plein enkele keren per week;
- 25 % enkel keren per maand en
- 17,5 % slechts incidenteel.

Onder vrachtautobestuurders is dat geheel anders: 92 % van de respondenten gebruikt het plein enkele keren per week. De overige 8 % vertegenwoordigt één respondent.

Bewegwijzering

De onderzoekers melden dat de bewegwijzering op en rond het plein onder zowel personenautobestuurders als vrachtwagenbestuurders redelijk scoort. In Tabel 6.6.3 is de score vergeleken met die van de kluifrotonde Coldenhove.

Tabel 6.6.3 Oordeel over bewegwijzering op twee locaties

Locatie	Bewegwijzering	(zeer) duidelijk	neutraal	(heel) onduidelijk	totaal
Coldenhove	personenautobestuurders	83%	-	17%	100%
	vrachtautochauffeurs	92%	-	8%	100%
Doenkadeplein	personenautobestuurders	65%	10%	25%	100%
	vrachtautochauffeurs	77%	0%	23%	100%

Het verschil onder vrachtautobestuurders is opvallend. Vrachtwagenbestuurders met problemen t.a.v. de bewegwijzering op het Doenkadeplein geven als toelichting, dat de bewegwijzering te kort voor het plein geplaatst is, waardoor er te snel geanticipeerd moet worden. Bestuurders van personenauto's misten wegwijzers op het plein.

Duidelijkheid en overzichtelijkheid lay-out

De resultaten van de antwoorden op deze vragen zijn samengevat in Tabel 6.6.4. Personenautobestuurders hebben meer moeite met de duidelijkheid en overzichtelijkheid van het plein dan vrachtautobestuurders. Dat bleek ook het geval bij de kluifrotonde Coldenhove, zij het dat de score daar positiever was.
Tegen die achtergrond is de score van 30,8 % voor de onoverzichtelijkheid van het voorsorteren voor vrachtautobestuurders opvallend hoog (dus lage score voor de overzichtelijkheid). Als argument noemden respondenten, dat de aanduidingen te laat zijn aangegeven en bovendien dat het onoverzichtelijk is wanneer er van een tweestrooks- naar een vier- en zelfs nog meerstrooksweg gegaan wordt.

Tabel 6.6.4 Uitkomsten enquête Doenkadeplein t.a.v. duidelijkheid en overzichtelijkheid

Turboplein Doenkadeplein				
Voertuig	personenauto # 40		vrachtauto # 13	
Duidelijkheid	voorsorteren	te volgen route plein	voorsorteren	te volgen route plein
duidelijk of heel duidelijk	*60,0%*	*52,5%*	76,9%	76,9%
niet duidelijk en niet onduidelijk	*12,5%*	*12,5%*	7,7%	7,7%
onduidelijk /heel onduidelijk	*27,5%*	*35,0%*	15,4%	15,4%
	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Overzichtelijkheid				
overzichtelijk of heel overzichtelijk	*62,5%*	*60,0%*	69,2%	92,3%
niet overzichtelijk en niet onoverzichtelijk	*15,0%*	*10,0%*	0 %	0%
onoverzichtelijk en heel onoverzichtelijk	*22,5%*	*30,0%*	30,8%	7,7%
	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Deze gegevens, gecombineerd met het commentaar van de vrachtautobestuurders, is de aanleiding voor de auteur geweest om kritisch naar de richtlijnen voor de bewegwijzering te gaan kijken. Dat heeft geleid tot de ontwikkeling van de strookwisselwegwijzer voor de aanvoertakken vóór de voorsorteervakken (zie paragraaf 5.5.6).

Subjectieve veiligheid

De beoordeling van de veiligheid van het plein verschilt niet veel tussen personenautobestuurders en vrachtautobestuurders: (zeer)veilig ca. 70%. Met als motiveringen: door de verhoogde rijbaanafscheidingen heeft men veelal een veiliger gevoel dan op meerstrooksrotondes, terwijl ook wordt aangegeven dat de snelheid op het Doenkadeplein dermate laag is, dat dit de veiligheid ten goede komt. Degenen die het plein als (zeer) onveilig beoordelen (7,5 % à 7,7 %) doen dat voornamelijk doordat mensen vaak/soms fouten maken.

Vergissingen

De antwoorden op de vraag naar eigen vergissingen was verdeeld volgens Tabel 6.6.5.

Tabel 6.6.5 Zelf vergissingen maken op Doenkadeplein

voertuig	nooit	in het begin wel eens	nog incidenteel	nog regelmatig	totaal
personenauto # 40	40,0%	37,5%	17,5%	5,0%	100%
vrachtauto # 13	61,5%	30,8%	0,0%	7,7%*)	100%

*) Dit percentage vertegenwoordigt het antwoord van één chauffeur.

6.7 Conclusies

Veiligheidsonderzoeken

Er bestaan verschillende methoden om de veiligheid van verkeersoplossingen met elkaar te vergelijken. Uit onderzoek blijkt, dat de verkeersstromen de belangrijkste verklarende variabele vormen voor het aantal (letsel)ongevallen. Maar de relatie daartussen is complex van aard. Dit probleem wordt in belangrijke mate geëlimineerd door voor-en-nastudies, althans voor zover de verdeling en omvang van de verkeersstromen niet sterk wijzigen.

Door de auteur is in 2005 gekozen voor het uitvoeren van een voor-en-na-analyse om het veiligheidseffect van turborotondes te bepalen in vergelijking met die van enkelstrooksrotondes. In deze studie bleek het 'kale' veiligheidseffect van de turborotonde overeen te komen met dat van de enkelstrooksrotonde, namelijk rond de 82 %. Dezelfde studie laat via een uitgebreide analyse van de veiligheidsgegevens van enkelstrooksrotondes echter zien, dat een dergelijk resultaat ongeschikt is voor generalisatie. Allerlei factoren, zoals 'regressie naar het gemiddelde' en 'correctie voor algemene risico-ontwikkeling' nuanceren veelal de gemeten effecten. Een nog belangrijker effect bij de enkelstrooksrotondes blijkt de prioritering van veiligheidsprojecten door de wegbeheerders te zijn. Daarin spelen zeker niet alleen toevallige factoren een rol (waarvoor gecorrigeerd kan worden door rekening te houden met 'regressie naar het gemiddelde'), maar ook verschillen tussen kruispunten die structureel van aard zijn – door de auteur aangeduid als verschillen in gevaarzetting. Door al deze factoren samen, dient het reductiepercentage voor slachtofferongevallen door aanleg van enkelstrooksrotondes van 82,9 % verlaagd te worden tot 68,1 %.

Verwacht moet worden dat ook turborotondes aangelegd gaan worden op punten met een lagere gevaarzetting dan die waar met de aanleg is begonnen. Op grond van theoretische overwegingen – een turborotonde kent meer conflictpunten dan een enkelstrooksrotonde – mag niet verwacht worden dat het veiligheideffect van de aanleg van turborotondes in de toekomst hoger zal zijn dan die van enkelstrooksrotondes.

Doordat nog maar twee turbopleinen in gebruik zijn, kunnen geen betrouwbare conclusies worden getrokken ten aanzien van de veiligheid van deze pleinen. Wel laten de cijfers een niet-significante afname van het aantal (letsel)ongevallen zien. In de zeven waarneemjaren is bijvoorbeeld op beide pleinen geen enkel ernstig ongeval geregistreerd.

Belevingsonderzoeken

Zowel de turborotonde als het turboplein vergt van de automobilist een andere rijstijl. In plaats van rijstrookinformatie op bewegwijzering in de marge in zich op te nemen, noodzaken de verhoogde rijstrookscheidingen tot een adequaat reageren op die informatie, wil men de turborotonde en het turboplein zonder problemen kunnen berijden. Omdat het verboden is op een kruisingsvlak een andere richting te kiezen dan die welke door de pijlmarkering wordt aangegeven, geldt dit probleem in principe op alle kruispunten met een strookindeling. Maar de weggebruiker merkt dat niet totdat er een ongeval heeft plaatsgevonden. De rijbaangeleiding maakt het probleem van de slordige rijstrookkeuze echter manifest, ook zonder dat er een ongeluk heeft plaatsgevonden.

Op een turborotonde verloopt de strookkeuze desondanks veelal zonder veel problemen, omdat het merendeel van de weggebruikers – in een goed ontwerp – niet van rijstrook hoeft te wisselen. Uit de onderzoeken blijkt, dat (mede daardoor) het juist voorsorteren een kleiner probleem oplevert, dan aanvankelijk door de auteur werd gevreesd. De score onder personenauto- en vrachtautobestuurders van 73 % resp. 87 % t.a.v. de duidelijkheid in het gebruikersonderzoek kluifrotonde Coldenhove is positief. Op turbopleinen is het aantal rijstroken groter, zodat ook de rijstrookkeuze complexer is. Het evaluatieonderzoek van de turbopleinen heeft aan het licht gebracht, dat een verbetering van de voorwegwijzers noodzakelijk is ter compensatie van de relatief korte voorsorteerstroken, waarmee uit capaciteitsoogpunt zowel bij de turborotonde als het turboplein kan worden volstaan.

Daarnaast komt ook de foutieve manoeuvre 'binnendoor linksaf' op turborotondes en turbopleinen voor. Op turborotondes leidt die in veel gevallen niet tot een probleem[192], maar op turbopleinen is een extra manoeuvre nodig om de fout te herstellen. De oorsprong van dit foutieve bestuurdersgedrag is gelegen in verouderde pleinontwerpen, die strookwisselen op het plein noodzakelijk maken – ten koste van de capaciteit en de veiligheid. Voor de ontwerper is echter ook dit – in alle opzichten ongewenst – gedrag een gegeven. Voor de turborotonde zijn verbeteringsmaatregelen in paragraaf 3.5.5 behandeld en voor het turboplein in paragraaf 5.5.

Ten slotte kan als eindconclusie van dit hoofdstuk worden gesteld, dat verbetering van de veiligheid op kruispunten van gebiedsontsluitingswegen in de vorm van een rotonde niet hand in hand gaat met vereenvoudiging van de rijtaak: een vermindering van de taakbelasting op de rotonde zelf via rijbaanscheiding vraagt om een grotere mate van anticiperen bij het voorsorteren.

[192] Dit is eenvoudig vast te stellen met behulp van de vormgeving van de turbotondedes in Figuur 2.4-1. Overigens gold dat niet voor de kluifrotonde omdat die in feite de hoofdvorm van een knierotonde heeft.

7 Samenvatting en conclusies

Voorgeschiedenis

Het idee om op een kruispunt het verkeer rondgaand in één richting af te wikkelen is rond 1900 zowel in de Verenigde Staten als in Europa ontstaan. Voor de bedenkers ervan was een wevende verkeersafwikkeling een essentieel onderdeel van het verkeersplein. De voorrang van het verkeer werd in de praktijk niet eenduidig geregeld. Daardoor functioneerden de verkeerspleinen minder goed dan de bedenkers voor ogen had gestaan.

Begin jaren zestig (20e eeuw) werd in Engeland het grote voordeel van de regel 'pleinverkeer voorrang' ontdekt. Daardoor kunnen rotondes klein blijven en toch veel verkeer veilig verwerken, omdat de verkeersafwikkeling van karakter is veranderd: in plaats van invoegen en weven moeten de bestuurders nu een hiaat in de rotondestroom al dan niet accepteren. Door systematisch onderzoek – in de jaren zestig geïnitieerd door Frank Blackmore (1916 - 2008) – is dit inzicht internationaal bekend geworden.

De moderne Nederlandse rotonde is een variant op de Engelse rotonde. Werden in Engeland over het algemeen tangentiële toe- en afritten en bij uitzondering radiaal aansluitende takken door ruimtegebrek binnen de bebouwde kom toegepast, in Nederland vormen radiaal aansluitende takken een extra kenmerk dat zelfs is opgenomen in de definitie van de rotonde. Rond 1984/85 is de eerste moderne rotonde op initiatief van Kars Erné (1932-2010) in Nederland toegepast. Samen met de twee genoemde eigenschappen (pleinverkeer voorrang en radiaal aansluitende takken) heeft de enkelstrooks rotondebaan deze moderne rotonde tot een succes gemaakt.

Het concept voor Duurzaam Veilig heeft de wegbeheerders in Nederland nieuwe handvatten gegeven om de verkeersveiligheid te verbeteren. Op veel plaatsen is de moderne enkelstrooksrotonde de veiligste kruispuntoplossing die kan worden gerealiseerd. Voor kruispunten die meer verkeer moeten verwerken werd de compacte (concentrische)

tweestrooksrotonde ontwikkeld, waarop het verkeer zich in twee rijen naast elkaar kan afwikkelen. Deze vorm introduceert echter weer opnieuw het weven. Om ernstige snijconflicten te voorkomen werd in Nederland en Duitsland aanbevolen om de afvoertakken van slechts één strook te voorzien. Maar de weefconflicten worden daarmee niet geëlimineerd.

Turborotonde gebaseerd op Duurzaam Veilig-principes

De uitdaging voor de auteur was in 1996 om een tweestrooksrotonde te ontwikkelen die het probleem van weefconflicten niet kent. Deze studie laat zien dat een consequente toepassing van de principes van Duurzaam Veilig heeft geleid tot het ontwerp van de *turborotonde*. Zo is het streven naar herkenbare conflictpunten bepalend voor de keuze van de hoofdvorm. Maar ook de juiste uitvoering van een detail als het rotondeschild wordt in belangrijke mate door dit uitgangspunt bepaald. Een ander principe van Duurzaam Veilig is het realiseren van homogeniteit: de reductie van de conflictsnelheid leidt tot de introductie van rijbaanscheidingen. Het principe van vergevingsgezindheid is het uitgangspunt voor de overrijdbare vorm van deze rijstrookscheiding.

Ontwerpmethodiek

De spiraalvorm van turborotondes wordt ontworpen met behulp van cirkels waarvan de middelpunten verspringen. Dit is mogelijk omdat de doorrijsnelheden laag zijn, terwijl deze tracering voor de chauffeur minder stuurbewegingen oplevert. Omdat het aantal rijstroken waaraan voorrang moet worden verleend uit veiligheidsoverwegingen beperkt is tot twee, ontstaan verschillende turborotondevarianten, afhankelijk van het aantal rotondesegmenten waarover rijstroken gebundeld naast elkaar doorlopen. De turboblocken waarmee deze varianten ontworpen worden, verschillen in de booglengte waarover de rijbaan/ -strook de breedte van één rijbaan/ -strook opschuift (de spoed). De te kiezen turborotondevariant is afhankelijk van de verhouding van de verkeersstromen die de rotonde gaan gebruiken.

Eisen bewegwijzering en markering

Het uitgangspunt van de turborotonde is, dat bestuurders vroegtijdig de juiste rijstrook kiezen. Daarvoor is een op elkaar afgestemd systeem van rijstrookpijlen (in de vorm van ‘rotondepijlen’) voor zowel op het wegdek als wegwijzerborden ontwikkeld. Omdat de voorsorteervakken bij turborotondes veelal kort zijn, is het nuttig aan weggebruikers voorinformatie te geven over de indeling van de voorsorteerstroken die zij naderen. Daarvoor is de wisselstrookwijzer als alternatieve voorwegwijzer ontwikkeld.

Capaciteitsonderzoek turborotondes

Om in ex-ante evaluaties de capaciteit van verschillende vormen van turborotondes te kunnen bepalen is in 2000 de MEERSTROOKSROTONDEVERKENNER ontwikkeld. In eerste instantie was dit model louter synthetisch van aard; later kon een beperkte kalibratie worden uitgevoerd. Eerst in 2007 was het mogelijk op een turborotonde (Nieuwerkerk a./d. IJssel) uitgebreide capaciteitswaarnemingen te doen.

Voor de bepaling van de capaciteit van rotondetoeritten worden in de literatuur twee capaciteitsmodellen beschreven: lineaire modellen en exponentiële modellen gebaseerd op de hiaatacceptatie-theorie. De parameters in het eerstgenoemde type kunnen alleen op

stroomniveau worden bepaald. De theorie van de hiaatacceptatie gaat ervan uit, dat het mogelijk is gedragsparameters (het kritisch hiaat, de oprijvolgtijd en de minimum volgtijd) te bepalen op basis van metingen op voertuigniveau, waarmee dan de capaciteit bepaald kan worden. Omdat op de Nederlandse rotondes ook het schijnconflict een rol speelt (dat wordt veroorzaakt door voertuigen die de rotonde via de naastgelegen afvoertak verlaten zonder richting aan te geven) is het in deze methode ook nodig om over capaciteitsmetingen te beschikken.

In de analyses van deze verschillende databronnen (op voertuigniveau en stroomniveau) is gebleken dat:

- de parameterschatting op voertuigniveau voor enkelstrooksrotondes redelijk overeenkomt met de schattingen op stroomniveau;
- maar dat dit in complexere verkeerssituaties niet meer het geval is.

Niettegenstaande dit tekort in de huidige hiaatacceptatie-theorie, is het mogelijk met een model gebaseerd op die theorie tot betere resultaten te komen dan met een lineair model, mits de parameters op basis van metingen op stroomniveau worden aangepast. Nader onderzoek zal nodig zijn om te bepalen welke assumpties die aan de hiaatacceptatie-modellen ten grondslag liggen, verantwoordelijk zijn voor de geconstateerde tekortkomingen.
De bevindingen in deze studie laten zien dat het vooralsnog ook om deze reden noodzakelijk is een schattingsmethodiek toe te passen waarin zowel van data op voertuigniveau (i.c. hiaatwaarnemingen) als van waarnemingen op stroomniveau (vijf-minutenwaarnemingen) in verzadigde toestand gebruik wordt gemaakt.

Met de gevonden functies is het mogelijk de capaciteit van de turborotonde te vergelijken met de resultaten van metingen op compacte concentrische tweestrooksrotondes in Duitsland. Deze metingen bevestigen het inzicht dat met behulp van de MEERSTROOKSROTONDE-VERKENNER al was verkregen: doordat het verkeer op de turborotonde de binnenste rotondestrook stelselmatig beter benut, is de capaciteit daarvan hoger dan die van de compacte concentrische tweestrooksrotonde.

Mogelijkheden rotonde-doseerinstallatie op turborotonde

De turborotonde is ontworpen om – evenals de enkelstrooksrotonde – zonder verkeerslichten te functioneren. Desondanks is onderzocht in hoeverre het mogelijk is om met behulp van verkeerslichten een hogere capaciteit te bieden. Geconstateerd is, dat een turborotonde met vier takken door zijn geringe omvang niet meer capaciteit biedt als deze met (volledige) verkeerslichten wordt uitgerust. Echter is gevonden – zowel analytisch als met behulp van simulatieberekeningen – dat met behulp van een rotonde-doseerinstallatie (RDI) gedurende spitsperioden niet alleen een ‘eerlijker’ verdeling van de wachttijd over alle toeritten kan worden bereikt maar ook een verhoging van de capaciteit van de betreffende toeritstrook van 15 - 50 %, zonder verslechtering van de capaciteit van de tak waarop het rotonde-doseerlicht is geplaatst.

Turboplein met verkeerslichten

Voor het uitrusten van een rotonde met een volledige verkeerslichtenregeling is het nodig, dat het rotondeontwerp wordt aangepast en vergroot. Uitgaande van radiaal aansluitende takken dienen de afvoertakken dan tangentieel aan te sluiten. De vorm die dan ontstaat wordt

turboplein genoemd. Wil een turboplein geheel zijn afgestemd op het toepassen van verkeerslichten, is het nodig dat de rijstroken bestemd zijn voor een exclusieve richting.

Bij een turboplein geldt in sterkere mate dan bij een turborotonde, dat de automobilist in staat moet zijn op tijd de juiste rijstrook te kiezen. Qua verkeersafwikkeling kan de lengte van de voorsorteerstroken veelal beperkt blijven – korter dan bij een viertakskruispunt met hetzelfde aantal rijstroken nodig is. Maar voor een goed overzicht over het grote aantal opstelstroken (veelal meer dan vier) is het toch noodzakelijk de voorsorteervakken zo lang te maken, dat twee wegwijzerportalen toegepast kunnen worden. Daarnaast zijn vóór de eigenlijke voorsorteervakken voorwegwijzers nodig, die aangeven hoe verderop in relatie tot de bestemming van strook gewisseld moet worden. Ook leveren rotondepijlen op een tweestrooksaanvoertak over een lengte van 180 m vóór het voorsorteervak een significante verbetering van het strookkeuzeproces op.

Met behulp van een analytisch model zijn de cyclustijden tussen het turboplein en een viertakskruispunt met evenveel rijstroken vergeleken. Daaruit kan worden geconcludeerd dat vooral bij zware verkeersbelastingen een turboplein zijn nut bewijst. De verhouding tussen de cyclustijd van een turboplein en de cyclustijd van een viertakskruispunt is veelal kleiner dan 1:2. Daarbij is ook de capaciteit groter zolang de linksafslaande stromen vanuit twee tegenovergestelde richtingen (globaal) niet meer dan 30% – 60% groter zijn dan de rechtdoorgaande stromen. Het maximale verschil treedt op als de linksafstromen even groot zijn als de rechtdoorgaande stromen.

Veiligheid turborotonde

Ten slotte is onderzoek gedaan naar de veiligheid en beleving van zowel de turborotonde als het turboplein. De veiligheid van turborotondes is in 2005 onderzocht in een uitgebreid onderzoek waarin ook die van enkelstrooksrotondes is betrokken. Gekozen is voor de methode van voor-en-na-analyse. Om met behulp van die methode uitspraken te kunnen doen die overdraagbaar zijn, is het noodzakelijk dat er correcties worden toegepast op de gevonden effecten. Uit de literatuur is bekend, dat zonder rekening te houden met ‘regressie van het gemiddelde’ en ‘trends in algemene veiligheidsontwikkeling’ er sprake is van een overschatting van het te verwachten effect. Daarnaast is in de studie van 2005 gebleken, dat de destijds gebruikte prioritering van veiligheidsmaatregelen op basis van ongevallengegevens tot gevolg heeft, dat op punten met een structureel hogere gevaarzetting eerder maatregelen worden getroffen. Voor de enkelstrooksrotonde kon zo worden bepaald, dat een gemeten slachtofferongevallenreductie van 82,9 % (effect van vervanging van viertakskruispunten, voornamelijk voorrangskruispunten) gecorrigeerd moet worden tot 68,3 % om een reële inschatting te verkrijgen van het te verwachten effect op punten die er qua onveiligheid niet uitspringen.

Op turborotondes werd een verrassend hoge reductie van het aantal slachtofferongevallen gemeten van 82%. Voor turborotondes was de waarneemperiode te kort om daarvoor alle afzonderlijke toe te passen correctiefactoren te berekenen. Maar het is niet te verwachten dat die kleiner zullen zijn dan die voor de enkelstrooksrotondes.

De gemeten reductiepercentages inclusief de correctie voor de ‘trends in algemene veiligheidsontwikkeling’ en ‘regressie van het gemiddelde’ van de turborotondes (waardoor de gemeten reductie van 82% gecorrigeerd wordt tot 76,1 %) zijn vergeleken met die van concentrische tweestrooksrotondes in de Verenigde Staten, die 71,8 % bedraagt. Hoewel die afname kleiner is dan voor turborotondes, kan een statistisch significant verschil niet worden vastgesteld. Opvallend is wel dat de afname van alle ongevallen op de concentrische tweestrooksrotonde in de Verenigde Staten slechts 18 % bedraagt, terwijl op de turborotondes in Nederland een – ongecorrigeerde – afname van 49 % is gemeten.

Belevingsonderzoeken turborotonde en turboplein

In 1999 is een enquête uitgevoerd onder de gebruikers van de eerste turborotonde in de vorm van een kluifrotonde. De score van 73% door personenautobestuurders en 87% door vrachtautobestuurders voor de duidelijkheid van de turbo-kluifrotonde Coldenhove is positief. Qua (on)mogelijkheden van strookwisselen stond deze rotonde model voor later gebouwde turborotondes. Daarom is dat onderzoek niet herhaald op later gebouwde turborotondes. Uit – niet gerapporteerde – gedragsobservaties bleek de ‘linksaf-binnendoor’manoeuvre op te treden, wat tot aanpassing van het beginpunt van de binnenste rotondestrook in de later gebouwde turborotondes heeft geleid.

De gebruikers van het turboplein Doenkadeplein oordeelden met een score van 52,5% qua duidelijkheid voor de te volgen route op het plein. Voor de vrachtautobestuurder was die score 76,9%. Dit is minder positief dan voor de turborotonde. Vooral de score onder de personenautobestuurders is aanleiding geweest om verbeteringen voor te stellen voor de bebording en markering van het turboplein, die al in hoofdstuk 5 zijn verwerkt.

Nieuwe voorwegwijzer

Ook bleek in vele gesprekken met gebruikers van zowel de turborotonde als het turboplein, dat het tijdig kunnen kiezen van de juiste rijstrook als het meest genoemde punt van kritiek naar voren te komen. Gecombineerd met de opmerkelijk achterblijvende score onder vrachtautobestuurders t.a.v. de overzichtelijkheid van het voorsorteren voor het Doenkadeplein, heeft dat geleid tot aanpassing van de voorwegwijzer bij zowel de turborotonde als het turboplein.

Samenvattende conclusie

Samenvattend kan worden gesteld, dat het toepassen van Duurzaam Veilig-principes inderdaad tot een veiliger ontwerp voor de meerstrooksrotonde heeft geleid met een verbetering van de doorstroming. Wel vraagt het ‘turboprincipe’ van weggebruikers een betere oriëntatie op strookgebruik dan zij op gebiedsontsluitingswegen gewend zijn. Om dat te bevorderen is een alternatief voor de voorwegwijzer ontwikkeld.

Nader onderzoek

Een aantal vragen kon in het kader van deze studie niet beantwoord worden. Daarom volgen hier enkele aanbevelingen voor nader onderzoek.

- In de verkeersonderzoeken zijn niet de volledige verkeersstromen op de rotonde in de vorm van herkomst-bestemmingcombinaties vastgelegd. Omdat er sterke aanwijzingen

zijn, dat het voor de aard van het schijnconflict van belang is of een voertuig van de voorgaande tak of het voorgaande segment afkomstig is, dient in verder rotondeonderzoek van de verkeersstromen niet alleen het strookgebruik maar ook de herkomst- en bestemmingstak vastgelegd te worden.

- De data van de verkeersafwikkeling op de onderzochte rotondes lieten het niet toe om vast te stellen óf en in hoeverre een dominante verkeersstroom afkomstig vanaf een enkele tak de toeritcapaciteit van een volgende tak nadelig beïnvloedt, omdat op geen van de rotondesegmenten daarvan sprake was. Het is gewenst op rotondes waar dat wel het geval is hiernaar aanvullend onderzoek te doen.

- In 2008 is de rechthoekige binnenhoek aan het begin van de binnenste rotondestrook geïntroduceerd (zie paragraaf 3.5.5). Verwacht wordt dat daardoor niet alleen het zicht op het verloop van de rotondestroken vanaf de rechter toeritstrook verbetert maar ook vanaf de linker toeritstroken. Een punt van nader onderzoek is de vraag of hierdoor de beoordeling van de verkeerssituatie zodanig wordt vereenvoudigd, dat een hogere oprijcapaciteit het gevolg is.

- De positieve effecten van rotonde-doseerlichten op tweestrooks toerittakken zijn zowel analytisch als met behulp van simulatieberekeningen vastgesteld. De detectorconfiguratie en het afstellen daarvan zal in de praktijk dienen plaats te vinden. Het is zeer aan te bevelen dit met vóór-en-na onderzoek te begeleiden.

- Het turboplein is aanvankelijk in compacte vorm (met rijbaanscheidingen van 30 cm breed) ontworpen, uitgaande van de toepassing van wegdekleds voor de routegeleiding op de kruisingsvlakken. Doordat er ten tijde van de bouw van de eerste turbopleinen geen robuuste wegdekleds beschikbaar waren, zijn deze pleinen als alternatief voorzien van brede verkeersgeleiders. Dit gaat ten koste van de duidelijkheid en overzichtelijkheid van de gerealiseerde pleinen. Gelet op de reacties hierop van personenautobestuurders, blijven wegdekleds gewenst. Op turbopleinen voorzien van brede verkeersgeleiders kan de robuustheid van wegdekleds beproefd worden, zonder dat het juiste functioneren van het plein in gevaar komt. Wanneer de robuustheid daarvan onomstotelijk vast staat, kunnen ook compacte turbopleinen worden toegepast.

- Gelet op het feit dat het veiligheidsonderzoek van de turborotonde zich over een beperkt aantal jaren uitstrekt, is een uitgebreider onderzoek aan te bevelen. Aandacht aan de veiligheid van (brom)fietsers – gerelateerd aan de toegepaste voorrangsregeling – is daarbij gewenst. Om een nauwkeurigheidsniveau te bereiken die vergelijkbaar is met de resultaten voor de enkelstrooksrotondes in deze studie, is evenwel een verbetering noodzakelijk van de registratie van verkeersongevallen in Nederland.

Turbo Roundabout and Turbo Circle:
Design, Capacity and Safety

Summary

Historical Context

The idea to install one-way circulatory traffic management on intersections was struck around 1900, both in the USA and Europe. The devisers regarded the principle of merging and weaving essential for the rotary system and, in practice, right of way had not yet been regulated unambiguously. This resulted in traffic circles performing worse than the devisers had in mind.

In the early sixties (20th century) in the United Kingdom, the rule of giving priority to circulatory traffic was discovered to have significant advantages since the change in the traffic operation it enabled roundabouts to be kept small enough to handle a lot of traffic safely. Instead of facilitating merging and weaving at high speed, drivers had no option but to accept a break in the circulatory traffic flow. Systematic research, initiated by Franck Blackmore (1916 - 2008) in the sixties, got this insight worldwide attention.

The modern Dutch roundabout is a variation on the British roundabout. In the UK tangential approaches and exits are normally applied, with radial approaches the exceptional when there is a lack of space in built-up areas. On the other hand, in the Netherlands both the approaches and exits are radial, to such an extent that these have become a distinctive feature in the Dutch definition of a roundabout. In the Netherlands the building of the first modern roundabout was initiated by Kars Erné (1932-2010). In addition to the two features mentioned (priority to roundabout traffic and radial connecting legs) the single-lane circulatory roadway has made this modern roundabout a success.

The concept for Sustainable Safety offered the road owners a new grip on improving road safety. At many spots, the modern single-lane roundabout is the safest type of intersection but where larger volumes of traffic have to be handled, the compact two-lane roundabout was

developed, based on the same concentric design principle as the single-lane roundabout, but handling two lanes of traffic. However, this configuration again introduces the necessity to weave. To avoid serious cutting-in conflicts in the Netherlands and Germany it was recommended to provide the departure leg with a single lane. However, this does not eliminate weave conflicts.

Turbo Roundabout based on Sustainable Safety Principle

In 1996 the challenge to the author was to develop a two-lane roundabout without weaving conflicts. This study shows that the consistent application of the principles of sustainable safety leads to a safe design of the *Turbo Roundabout*. Striving for recognisable points of conflict determines the choice of the main shape. But also the design of a detail such as the roundabout shield is largely determined by this principle. Another principle of sustainable safety is realising homogeneity by reducing speed, which leads to the introduction of lane-dividers. The principle of forgivingness is the basis of the mountable shape of the lane-dividers.

Design Methodology

The spiral shape of turbo roundabouts can be designed using circles with staggered central points. This is made possible by the low driving speed, and it offers a route with fewer steering movements for the driver. Safety is the factor in limiting the number of yielding roundabout lanes to no more than two. This leads to the need to tailor different types of turbo roundabouts to different traffic volume patterns. The number of circle segments on which lanes have to be continued as a cluster determines the shape of the turboblock: the way the circle centres are staggered depends on the question the circulating lanes have to shift up one lane outwards over one, two, three or four segments.

Requirements Signposting and Lane Marking

The principle that drivers choose the correct lane on the approach leg is fundamental to the turbo roundabout. To this end a coherent system of lane arrows (Dutch roundabout arrows analogue to fishhook arrows) on both the road surface and on signposts has been developed. Because the approach lanes to turbo roundabouts tend to be short, it is useful to inform the drivers about the lane division before they reach the point at which they must make a choice. Hence the development of a new type of switch signpost option to the approach lane.

Capacity Research Turbo Roundabout

To choose the right type of turbo roundabout in a pre-evaluation, in 2000 the MULTI-LANE ROUNDABOUT EXPLORER was developed. Initially this model was of a rather synthetic nature but later it became possible to carry out a simple calibration. Only in 2007 it was possible to do more extended capacity measurements on a turbo roundabout (in Nieuwerkerk a/d IJssel).

In the literature two types of model are mentioned to determine the capacity of roundabouts: linear models and exponential models based on gap acceptance theory. The parameters of the first type of model can only be estimated at traffic flow level. The gap acceptance theory is based on the assumption that the behavioural parameters (the critical gap, the follow-on time and the minimum headway) can be estimated at vehicle level, by which the capacity is to be determined. Because the pseudo-conflict (caused by vehicles leaving the roundabout via the

opposite leg direction, particularly without using the direction indicator) plays a part on Dutch roundabouts, in the latter method it is necessary to have access to measurements in a saturation situation.

In analysing the different data sources (at vehicle level and traffic flow level) it was found that the estimation of vehicle level based parameters corresponds with the results based on the traffic flow level whereas in more complex situations this is not longer the case. In spite of this deficiency in the present gap acceptance theory, it is possible to gain better results with a model based on this theory than with a linear model, provided that the parameters are adjusted for traffic flow measurements under saturation conditions. Further research will be necessary to determine which of the underlying assumptions of the gap acceptance models are accountable for these deficiencies. The findings of this study reveal that for the time being it is necessary, also for this reason, to employ a method of estimation that incorporates both data at vehicle level (gap observations) and observations at circulation level (five-minute observations) in a saturation situation.

The functions found make it possible to compare the capacity of turbo roundabouts with the results of measurements on compact two-lane roundabouts in Germany. These data confirm the findings of the MULTI-LANE ROUNDABOUT EXPLORER: the fact that traffic on the turbo roundabout makes better use of the inner roundabout lane, the capacity will be higher than that of a compact two-lane roundabout.

Possibilities of a Roundabout Metering Signal

The turbo roundabout is designed for operating without traffic lights, just as single-lane roundabouts. Nevertheless, the possibility to expand the capacity of turbo roundabouts by applying signalisation was examined but concluded that a fully signalised turbo roundabout with four legs will not offer any higher capacity than without signals. However, both analysis and simulation found that a roundabout metering signal (RMS) not only results in a more fair distribution of waiting time during peak periods but will also increase the capacity: the capacity of the left lane of the next connecting leg will increase from 15% to 50% without reducing the capacity of the leg on which the RMS is placed.

Signalised Turbo Circle

It is necessary to enlarge and change the shape of a roundabout to use full signalised equipment effectively. Starting from the radial connecting approach legs, the departure legs must exit the roundabout tangentially. The resulting shape is called a *Turbo Circle*. And for tailoring a traffic circle expressly to the application of traffic lights, it will be necessary for each lane to be reserved for one direction. For a turbo circle it is more important than for a turbo roundabout that a driver is able to choose the right lane in time. As for handling traffic volumes, this will mostly require short selection lanes – shorter than the approach legs of a signalised intersection with the same number of lanes. But to gain a good overview of the many lanes (mostly more than four), it is necessary all the same for the selection lanes are sufficiently long that two signpost portals can be situated behind each other. In addition to this pre-lane switch, signposts are needed in advance of the actual selection lanes to inform the drivers how to switch lane to the selected destination. Also, roundabout arrows over a 180 m

stretch on a two-lane approach leg will significantly improve the process of lane switching later on.

An analytical model has been derived to compare the cycle times of a turbo circle and a four-leg intersection (with the same number of lanes: in every direction two lanes). From that it may be concluded that a turbo circle proves its usefulness in situations with high traffic volumes. Above 6,000 pcu/h the cycle time of a turbo circle tends to be lower than half of that of a four-leg intersection. Then the total capacity will also be higher under the proviso that two opposite left-turn volumes are not higher than 130% to 160% of the straight-on volumes of these legs.

Safety of the Turbo Roundabout

Finally, the safety and perception of turbo roundabouts as well as turbo circles have been investigated. The safety of the turbo roundabouts was researched in 2005 by a before-and-after study also involving single-lane roundabouts, which necessitates the results of these comparisons to be corrected with certain factors. From literature it is known that without calculating regression-to-the-mean and trends in the overall safety effects, the general safety effects of measurements will be overestimated. In addition, the 2005 study proved that not only the incidental but also the structural differences in risk setting will influence the priority of safety measurements, so measures will have been taken for the most dangerous spots. It has been possible to determine that for the single-lane roundabouts a correction of the accident victims must be reduced from 82.9% to 68.3% to get a good figure of the effectiveness of replacing four-legged (mostly two-way-stop) crossings by single-lane roundabouts.

The replacement of intersections by turbo roundabouts has shown a surprisingly high reduction of 82%. The observation time was too short to define the structural component of the effect of the prioritising process by officials, but it is not expected to be less than that for the single-lane roundabouts. Applying the corrections for regression-to-the-mean and the trends in the overall safety effects in the number of injury crashes by turbo roundabout replacements, the reduction percentage of 82% has to be reduced to 76.1%. This is comparable with the figure of 71.8% in the United States for replacement by concentric two-lane roundabouts. Although this is a smaller reduction, this is not a statistically significant difference. But what is striking is the difference in reduction of the total number of accidents by concentric two-lane roundabouts in the US (18 %) and by turbo roundabouts (49 %, in this case not corrected).

Investigation of the perception of the turbo roundabout and the turbo circle

In 1999 a survey of users of the turbo roundabout in the shape of a bone-roundabout was carried out. The score for clarity of the Coldenhove turbo bone-roundabout was 73% for private car drivers and 87% for truck drivers, a result that can be regarded as positive. In terms of the possibility or otherwise for lane changing, this roundabout is a model for turbo roundabouts built later on, so a similar survey was not repeated for other turbo roundabouts. In unrecorded observations ‘left-turn, short-cut’ manoeuvres were ascertained, which led to a change at the start of the inner circulatory lane of later turbo roundabouts.

Private car users of the *Doenkadeplein* turbo circle judged the route clarity on the circle itself as 52.5 % while truck drivers score it 76.9%, a less positive result than the turbo roundabout. The private car user score in particular prompted improvements to be proposed to both the signing and marking of the turbo circle, and these have been incorporated in the recommendations of chapter 5.

New Pre-Signpost

In many discussions with users of the turbo roundabout as well as the turbo circle, the aspect of choosing the right lane in time has been mentioned as the main point of critique. Combined with the conspicuous low rate of the surveyability of the lane selection in the approach of the *Doenkadeplein*, this prompted a change from the general roundabout pre-signpost into a pre-lane switch signpost for the turbo roundabout and the turbo circle.

In Conclusion

Summarising, it can be stated that the application of sustainable safety principles really leads to a more safe design of a multi-lane roundabout combined with the possibility to handle greater traffic volumes. Meanwhile, it has to be realised that the turbo principle demands more attention to lane selection on distributor roads than road users are used to. An alternative for the pre-signpost has been developed to stimulate better lane selection and this will be incorporated in the national guideline for signposting.

Further Research

Some questions could not be answered in the context of this study. Therefore recommendations for further research include:

- In the surveys not all traffic flows – in the form of an origin-destination matrix – on a roundabout have been recorded. Because of the strong indications that the influence of the pseudo conflicts depends on the question of whether the vehicles are coming from the leg ahead or the segment ahead, further roundabout surveys also need to record not only the lane use but also the legs of origin and destination.

- The traffic flow data of the roundabouts surveyed did not allow to determine whether and how strongly a dominant flow from a single leg influences the capacity of the next entry. Further research that compares roundabouts data with a dominant flow from a single leg is recommended.

- In 2008 the right-angled start of the inner circulatory lane was introduced (par 3.5.5). It is to be expected that not only the view from the right entry lane will be improved but also the overview on the left entry lane. An item for further research is the question of whether this will also expand the capacity of that left entry lane.

- The positive effects of roundabout metering signals on the two-lane approach legs have been determined by analysis and simulation. The detector configuration, and especially the fine tuning/adjusting in practice, will be a matter of practical evidence so a corresponding pre and post survey is recommended.

- The turbo circle was originally designed in a compact shape (with lane dividers 30 cm wide), based on the premise to apply LEDS in the road surface to guide the drivers in their lanes in the conflict areas. But at the moment of building the first turbo circles robust road surface LEDS were not available. Therefore, the turbo circles have been provided with wide splitter islands. But this diminishes their clarity and surveyability. Given the opinion of the car drivers the road surface LEDS are still welcome. On turbo circles with splitter islands, it will be possible to test the robustness of the road surface LEDS, without risking diminished functionality of the traffic circle. Once the robustness of the road surface LEDS has been established, they will also be applied on compact turbo circles.

- Regarding the short period available for research on the safety of turbo roundabouts, a more extended survey is recommended, with a focus on the safety of bicycles and moped riders related to right-of-way. To reach the level of accuracy comparable with the results of the research on the safety of single-lane roundabouts in this study, the registration of traffic accidents in the Netherlands has to be improved.

Literatuur

AASHTO (2001) *Geometric Design of Highways and Streets.* American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Washington, DC. ISBN 1-56051-156-7.

AASHTO (2004) *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Washington, DC. ISBN: 1-56051-263-6.

Akçelik, R. (1999), with contributions by Edward Chung and Mark Besley, *Roundabouts: capacity and performance analysis.* ARRB Transportation Research Ltd, Research Report ARR 321, ISBN 0 86910 762 3 / ISSN 0158-0728, Australia.

Akçelik, Rahmi (2007) A review of gap-acceptance capacity models, *29th Conference of Australian Institutes of Transportation Research* (CAITR 2007). University of South Australia, Adelaide, Australia, 5-7 December 2007 (Revised 28 January 2008).

Akçelik, Rahmi (2008) An Investigation of the performance of Roundabouts with Metering Signals. Paper presented at *TRB National Roundabout Conference, Kansas City.* MO. USA, 18-21 May 2008.

Arem, B. van (1992) *De rotondeverkenner –achtergrond.* Rapport INRO-VVG 1992-16, TNO, Delft.

Arem, Bart van, and Wim E. Kneepkens (1992) Capacities and Delays at Roundabouts in the Netherlands, *Highways; Proceedings of Seminar H held at the PTRC Transport, Highways and Planning Summer Annual Meeting,* 14-18, pp.257-268. September 1992, PTRC Education and Research Services LTD, Manchester, UK,

Arem, Bart van, en Willem Traag (1992) Rekenen aan rotondes, *Verkeerskunde,* 1992, 5, pp.23-25. ANWB, Den Haag.

Arndt, Owen K. and Rod J. Troutbeck (1995) Relationship between Roundabout Geometry and Accident Rates, *International Symposium on Highway Geometric Design Practices*. Boston, Mass., USA.

Ashworth, R. & C.J.D. Laurence (1978) A new procedure for capacity calculations at conventional roundabouts, *Proceedings of Seminar F, Transportation Planning Methods, 25th European Transport Forum.*

Beinum, A.S. van (2007) *Prestatieanalyse van de Turborotonde,* Afstudeerverslag 1187244. Technische Universiteit Delft.

Blackmore, F.C. (1963) Priority at Roundabouts. *Traffic Engineering & Control*. June 1963, pp.104-106.

Blackmore, F.C. (1970) *Capacity of Single-Level Intersections.* Crowthorne: Road Research Laboratory, Report LR356, 1970.

Boon, Ivo, Mitch IJdo, Nils Jansen, Roderick Pegtel en Corne Rutten (2011) *Strookwisselwegwijzer.* IBBibbPIP01c, PI-project Hogeschool Rotterdam.

Bosch, Paul van den, Floris Visser, Klaas Tenwolde (2010) Zeeuwse rotondes nog verkeersveiliger, *Verkeerskunde,* 2010, 1, pp.32-37. ANWB, Den Haag.

Bovy, Ph.H. (1990) Les giratoires: développements en Suisse romand et élebration d'un guide suisse. *Straße und Verkehr*, pp. 513-522, 9/90. Lausanne, la Suisse.

Bovy, Ph.H. (1991) Zusammenfassung der schweizerischen Kreiselhandbuchs, *Straße und Verkehr*, Vol.77, No. 3, pp.129-139. Lausanne, Schweiz.

Bovy, Ph.H. (1992) De 19 à 720 giratoires suisses en 15 ans: un renouveau et un essor spectaculaire in *Route et trafic*, no 6, juin 1992, pp. 389-413.

Braimaister, L. en L.G.H. Fortuijn (2005) Wegverbreding en/of bermverharding van smallere provinciale wegen: wat is het belang voor de verkeersveiligheid? *Verkeerskundige werkdagen 2005*, B18. CROW, Ede.

Brilon, W. (1988) Leistungsfähigkeit von Kreiselverkehrsplätzen, *Straßenverkehrstechnik,* 5, 1988, pp.165-175, Deutschland.

Brilon, W. (1988) Recent Developments in Calculation Methods for Unsignalized Intersections in West Germany, *Intersections without Traffic Signals* (W. Brilon, ed.), pp.111-153, Springer-Verlag, Germany.

Brilon, Werner und Birgit Stuwe (1991) Kreisvekehrsplätse –leistungsfähigkeit, Sicherheit und verkehrstechnische Gestaltung, *Straßenverkehrstechnik,* 6, 1991, pp.296-304, Deutschland.

Brilon, Werner und Birgit Stuwe (1993) Capacity and design of traffic circles in Germany. *Transportation Research Record* 1398, pp. 61-67, Transportation Research Board, Washington, D.C. USA.

Brilon, W., L. Bondzio, & N. Wu (1997) Neue Forschungsergebnisse zur Kapazität von Kreisverkerhsplätzen, *Straßenverkehrstechnik,* Heft 9, 1997. Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn, Deutschland.

Brilon, W. & R. Koenig, & R.J. Troutbeck, (1997) Useful estimation procedures for critical gaps, *Proc 3rd Int. Symposium on Intersections without traffic signals*. Ed. Michael Kyte. TRB.

Brilon, Werner and Mark Vandehey (1998) Roundabouts – The State of the Art in Germany. *ITE Journal*, November 1998, pp. 48-54.

Brilon, Werner und Hanno Bäumer (2004) *Überprüfung von Kreisverkehren mit zweistreifig markierter oder einstreifig markierter, aber zweistreifig befahrbarer Kreisfahrbahn.* Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 876, 2004, Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn.

Brilon, Werner (2011a) Studies on Roundabouts in Germany: Lessons Learned paper presented at the 3rd *International TRB-roundabout Conference, Carmel,* Indiana, May 2011, TRB.

Brilon, Werner (2011b) Roundabouts in Germany: State of the Art, International Roundabout *Design and Capacity Seminar*, 1st July 2011, Stockholm. http://www.nmfv.dk/PDF-filer/Vejnormalgruppen/Seminar_stockholm_juli_2011/RDC_Germany.pdf. (geraadpleegd februari 2012).

Brouwer, R.T.F. en S.M.J. Brouwer (2001) *Ontwerpelementen van rotondes met fietsers in en uit de voorrang.* TNO Technische Menskunde, rapport TNO TM-01-C009, Soesterberg.

Brown, Mike (1995) *The Design of Roundabouts*; *State of the Art Review*. Transport Research Laboratory, HMSO Publications Centre, Crown, London.

Brude, U & J. Larson (1996) The safety of cyclists at roundabouts; A comparison between Swedish, Danish and Dutch results. In *VTI Meddelande* No 810 A. 1996. Swedish National Road and Transport Research Institute.

Bureau Goudappel Coffeng (BGC, 1987) *Evaluatie Verkeerslichtenregelingen rotondes* in opdracht van Rijkswaterstaat, Dienst Verkeerskunde. Kenmerk RWE/593/13/Bn, Deventer, 5 oktober 1987.

Churchill, Tony, Henk Stipdonk & Frits Bijleveld (2010) *Effects of rounabouts on road casualties in the Netherlands.* Rapport R-2010-21, SWOV Institute for Road Safety Research, Leidschendam, The Netherlands.

Cowan, R.J. (1975) Useful headway models, *Transportation Research*, Vol. 7, no.6 Dec 1975 pp. 371- 375.

Coz, Jean le (1982) Quimper; carrefour giratoire à anneau prioritaire, *TEC no. 50*, janvier – février 1982.

CROW (1989) *Verkeerspleinen; Rapport van de werkgroep Rotondes*, Publikatie 24. Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek (CROW), Ede, juli 1989

CROW (1993) *Rotondes*, Publikatie 79. Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek (CROW), Ede, december 1993

CROW (1996) *Richtlijn ontruimingstijden verkeersregelinstallaties*, Publicatie 111. Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek, Ede.

CROW (1997a) *Kruispunten buiten de bebouwde kom; Aanbeveling voor toepassing middengeleider*, Publicatie 115. Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek (CROW), Ede.

CROW (1997b) *Handboek Categorisering wegen op duurzaam veilige basis*, Publicatie 116. Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek (CROW), Ede.

CROW (1998) *Eenheid in rotondes.* Publicatie 126. CROW, kenniscentrum voor infrastructuur, verkeer, vervoer en openbare ruimte, Ede, maart 1998.

CROW (2002a-d) *Handboek Wegontwerp wegen buiten de bebouwde kom, met de delen;* -Basiscriteria (a), -Stroomwegen (b), -Gebiedsontsluitingswegen (c), -Erftoegangswegen (d), Publicatie 164 a t/m d. CROW, kenniscentrum voor infrastructuur, verkeer, vervoer en openbare ruimte, Ede, februari 2002.

CROW (2002e) *Fietsoversteken op rotondes, Supplement bij publicatie 126 'Eenheid in rotondes'*, Publicatie 126a. CROW, nationaal kennisplatform voor infrastructuur, verkeer, vervoer en openbare ruimte, Ede, december 2002.

CROW (2005a) *Richtlijnen voor de bebakening en markering van wegen,* Publicatie 207. CROW, nationaal kennisplatform voor infrastructuur, verkeer, vervoer en openbare ruimte, Ede.

CROW (2005b) *Richtlijn bewegwijzering,* Publicatie 222. CROW, nationaal kennisplatform voor infrastructuur, verkeer, vervoer en openbare ruimte, Ede.

CROW (2008) *Turborotondes,* Publicatie 257. CROW, nationaal kennisplatform voor infrastructuur, verkeer, vervoer en openbare ruimte, Ede.

Crow, Edwin L., Frances A. Davis, and Margaret W. Maxfield, (1960) *Statistics Manual.* Dover Publications, Inc. New York, USA.

Daniels, S., T. Brijs, E. Nuyts, & G. Wets (2009) Injury crashes with bicyclists at roundabouts: influence of some location characteristics and the design of cycle facilities. *Journal of Safety Research*, 40 (2), pp.141-148.

Davidse, Ragnhild (2007) *Assisting the older driver; Intersection design and in-car devices to improve the safety of the older driver*. SWOV-disseratiereeks, Leidschendam, Nederland ISBN: 978-90-73946-02-6.

Davis, G.A. (2001). Relating severity of pedestrian injury to impact speed in vehicle pedestrian crashes. *Transportation Research Record.* No. 1773, pp.108-113.

DGP (2001) *Regeling Verkeerslichte.* Directoraat-Generaal Personenvervoer, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.

Dijkstra, A. (2004) *Rotondes met vrijliggende fietspaden ook veilig voor fietsers?* Rapport R-2004-14. SWOV, Leidschendam.

Drew, D.R. (1968). *Traffic flow theory & control*. McGraw-Hill.

DTF (2003) *Layout of Large Signal Controlled Junctions,* Part 8 of Section 2 'Junctions', Design Manual for Roads and Bridges, Volume 6 'Road Geometry', Standards for Highways. Highways Agency, Department for Transport. London, UK. http://www.dft.gov.uk/ha/standards/dmrb/vol6/section2/ta8603.pdf (geraadpleegd 24 -4-2012).

DTF (2007) *Geometric Design of Roundabouts,* 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. http://www.dft.gov.uk/ha/standards/dmrb/vol6/section2/td1607.pdf (geraadpleegd 24 -4-2012).

Elvik, R., A. Høye, T. Vaa and M. Sørensen (2009) *The Handbook of Road Safety Measures, 2e Edition.* Institute of Transport Economics, Oslo, Norway. Uitgever Emerald, ISBN: 978-1-84855-250-0.

Eno, William Phelps (1929) *Simplification of Highway Traffic*. The Eno Foundation for Highway Traffic Regulation, Inc, Saugatuck, CT, USA.

Eno, William Phelps (1939) *The Story of highway Traffic control 1899-1939*. The Eno Foundation, for Highway Traffic Control, Inc., Saugatuck, CT, USA.

Erné, K.J.B (1988) Verkeerspleinen, *Verslag Verkeerstechnische Leergang 1987*. ANWB, Den Haag, 1988.

Erné, K.J.B. (1994a*) Onderzoek verkeersveiligheid op tweestrookspleinen te Maastricht en Venlo; Samenvatting van de resultaten van 5 AVOC-studies,* Studie verricht in opdracht van de Directie Limburg van het Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat d.d. 3 juni 1994, kenmerk 11115. Adviesburo Verkeersveiligheid Erné BV, Apeldoorn, juli 1994.

Erné, K.J.B. (1994b) *Verkeerveiligheid op meerstrooksrotondes*. Niet gepubliceerd concept, met onderzoeksgegevens waarvan ook Van Minnen (1997) gebruik heeft gemaakt

Erné, K.J.B. (1995) Meer verkeer over de rotonde? *Verkeerskunde*, 46, 11, pp.40-44. ANWB, Den Haag.

ETSC (1996) *Symposium Brussels 5 November 1996*, Low-Cost/ High-Return Engineering Measures for Safer Roads, European Transport Safety Council.

FGSV (1993) Empfehlungen für die Anlage von Hauptverkehrsstraßen. Forschungs-gesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Strassenentwurf, EAHV 93, Köln, 1993 (Bild 102 en 103, pp.148 en 149).

FGSV (2006) *Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Srassenentwurf, Köln, ISBN 3-937356-83-5

FHWA (2000) *Roundabouts: An Informational Guide.* U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Safety Research and Development, Publication No. FHWA-RD-00-067, http://www.tfhrc.gov, en http://roundabouts.kittelson.com (geraadpleegd 24 -4-2012), National Technical Information Service, Springfield, Virginia 22181, June 2000

FHWA (2007) *Drivers' Evaluation of the Diverging Diamond Interchange*. Federal Highway Administration, Techbrief, Publication No. FHWA-HRT-07-048, Washington D.C., 2007. http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/07048/07048.pdf (geraadpleegd 15-11-2011).

Fisk, Caroline S. (1989) Priority Intersection Capacity: A Generalization of Tanner's Formula, *Transportation Research* 23B, pp.281-286.

Fortuijn, L.G.H. en J.G.C.M. Paulussen (1992a): Een duurzaam veilige weginfrastructuur: waar gaat het dan om? Bijdrage aan de studiedag *Grenzen aan de snelheid*. Initiatiefgroep Wijs op Weg, Amersfoort, 7 mei 1992, pp.159 en 160.

Fortuijn, L.G.H (1992b) A sustainable safe road infrastructure; the start of the realization, *First World Congress on Safety of Transportation*, 26-27 November 1992, Delft, pp.87-96.

Fortuijn, L.G.H. (1992c) Duurzaam veilig verkeer: nu de praktijk, *Verkeerskunde*, 1992, 12, ANWB, Den Haag.

Fortuijn, L.G.H. (1993) Naar een duurzaam verkeersveilig regionaal wegennet. *Verkeerskundige werkdagen 1993.* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (1994a) *Naar een duurzaam veilig wegverkeer*. Bureau Verkeer, Dienst Verkeer en Vervoer, Provincie Zuid-Holland, 27 mei 1994 (verzonden naar alle nieuw benoemde wethouders verkeer in de gemeenten van de provincie Zuid-Holland).

Fortuijn, L.G.H. (1994b) Preventief beleid voor duurzaam veilig verkeer, *Wegen* 1994, 7, pp.10-15, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (1994c) Doordachte maatregelen gunstig voor duurzaam veilig verkeer, *Wegen* 1994, 9, pp.16-21, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. en D.T. Kramer (1995a) Wegcategorisering; relatie tussen ritduurcriterium, trajectsnelheid en maaswijdte, *Verkeerskundige werkdagen 1995.* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (1995b) Kencijfers veiligheid kruispunten; een verklarend model voor de relatie tussen ongevallen en kruispunt-intensiteiten, *Verkeerskundige Werkdagen 1995*. CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (1996) Bijlage 'Indeling Wegcategorieën van de Provincie Zuid-Holland contactpersoon ir. L.G.H. Fortuijn bij *brief provincie Zuid-Holland aan CROW* d.d. 29 maart 1996, kenmerk VV-95060.

Fortuijn, L.G.H. en V.F. Harte, (1997) Meerstrooksrotondes: verkenning van nieuwe vormen, *Verkeerskundige werkdagen 1997.* CROW, Ede, 1997.

Fortuijn, L.G.H. en P.J. Carton, (2000a). Turbopleinen: een beproefd concept in een nieuw jasje, *Verkeerskundige werkdagen 2000*. CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2000b) Verhoogde baanscheidingen op een twee-strooksrotonde; keuze tussen kans op aansprakelijkheid of veiligheid. *Verkeerskundige werkdagen 2000*. CROW, Ede

Fortuijn, L.G.H. (2000c) Rotonde-pijlmarkering, *Verkeerskundige werkdagen 2000,* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2000d) Duurzaam veilige verkeerslichten, *Verkeerskundige werkdagen 2000.* CROW, Ede

Fortuijn, L.G.H.(2003a) Turbopleinen met verkeerslichten; het geometrisch ontwerp, *Verkeerskundige werkdagen 2003.* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. en A.M. de Leeuw (2003b) Turbopleinen met verkeerslichten; Verkeers-regeling en –afwikkeling, *Verkeerskundige Werkdagen 2003.* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2003f). Pedestrian and Bicycle-Friendly Roundabouts; Dilemma of Comfort and Safety, *Annual Meeting of the Institute of Transportation Engineers* in 2003 in Seattle, ITE, Washington D.C, USA.

Fortuijn, L.G.H., P.J. Carton en B.J. Feddes (2005a) Veiligheidseffect van kruispuntplateaus op gebiedsontsluitingswegen, *Verkeerskundige werkdagen 2005,* B20. CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2005b). Veiligheidseffect turborotondes in vergelijking met enkel-strooksrotondes. *Verkeerskundige werkdagen 2005,* B27. CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2005c) Voorrangsregeling fietsers op rotondes; overzicht van gegevens uit Nederlandse studies sinds 2000, *Verkeerskundige werkdagen 2005*, B52, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. en jhr. H.J.J. de Bosch Kemper (2006) Rotondes en turborotondes Over pijlen, strepen en stroken. *Verkeersrecht,* 2006, pp.101- 106. ANWB, Den Haag,

Fortuijn, L.G.H. en A.S. van Beinum (2007) Nieuwe inzichten in rotondecapaciteiten, *Verkeerskundige werkdagen 2007,* B9. CROW, Ede.

Fortuijn, Lambertus G.H. (2009a) Turbo Roundabouts: Design Principles and Safety Performance, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 2096,* Washington, D.C., U.S.A., 2009, pp.16-24.

Fortuijn, Lambertus G.H. (2009b) Turbo Roundabouts: Estimation of Capacity, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No 2130,* pp 83-92. Washington, D.C., U.S.A.

Fortuijn, L.G.H. (2009c) Bewegwijzering turborotondes: Introductie van de strookwisselwegwijze, *Verkeerskundige werkdag 2009,* bijdrage 5150802. CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2009d) Verbeterde bebording en markering turboplein, *Verkeerskundige werkdag 2009,* Bijdrage 5150803 CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. en A.M. de Leeuw (2009e) Eenvoudige wachtrijformules voor een stationair verkeersproces, *Verkeerskundige werkdag 2009*, bijdrage 5150808. CROW, Ede.

Fortuijn, Bertus en John Boender (2010) Nieuwe generatie bewegwijzering turborotondes en turbopleinen, weggebruik geeft nieuw inzicht. *Verkeerskunde,* 2010, 03, pp.32-37. ANWB, Den Haag.

Fuller, Ray (2002) 'Psychology and the Highway Engineer' en 'Learning and the Road User' in Fuller, R., J.A. Santos, ed. *Human Factors for Highway Engineers,* Elsevier Science Ltd, Amsterdam, ISBN: 0-080-43412-6, pp.77-98.

Gerts, F.H.J. (2002) *CROW-tonde of rotonde? Een onderzoek naar de verkeersveiligheid op enkelstrooksrotondes binnen de bebouwde kom.* Stagerapport. NHTV, Breda

Granneman, Bob (2011) Effect van verkeerslichten op turborotondes, Afstudeerscriptie CiTG, TU-Delft, mei 2011.

Green, Hilary (1977) *Accidents at off-side priority roundabouts with mini or small islands.* Transport and Road Research Laboratory, Department of the Environment Department of Transport, TRRL Laboratory Report 774. Crowthorne, Berkshire. ISSN 0305 – 1293.

Grontmij (1995) *Veiligheid middengeleiders*. Opdrachtgever CROW te Ede (CROW-publicatie 115), uitgevoerd door Grontmij Advies & Techniek bv / Transpute, juni 1994 - november 1995, De Bilt.

Hagring, O. (1996) The use of the Cowan M3 distribution for modelling roundabout flow. *Traffic Engineering & Control 37,* pp.329-332.

Hagring, Ola (1998) *Vehicle-vehicle Interactions at Roundabouts and their Implications for the Entry Capacity; A Methodological Study with applications to Two-lane Roundabouts.* Bulletin 159, University of Lund & Lund Institute of Technology, Department of Traffic Planning and Engineering, Box 118, S-221 000 Lund, Sweden. ISSN 0346-6256.

Hagring, Ola (2000) Estimation of critical gaps in two major streams. *Transportation Research Part B.* Elsevier Science Ltd. 2000. www.elsevier.com/locate/trb.

Hale, A.R., J. Stoop and J. Hommels (1990) Human error models as predictors of accident scenarios for designers in road transport systems. *Ergonomics,* 1990, vol 33 nos 10/11, 1377-1387.

Harders, J. (1968) Die Leistungfähigkeit nicht signalgeregelter städtischer Verkehrsknoten. *Straßenbau und Straßenverkehrstechnik,* Heft 76, Germany.

Hartz, Brigit (1995) Geschichte er Kreisverkehrspltätze und ihrer Berechnunfgsverfahren, *Straßenverkehrstechnik 12/1995*, pp.585-592, Germany.

Hauer, E. (1997) Observational Before-After Studies in Road Safety; Pergamom Press; Elsevier Science Ltd., Oxford, England.

HCM (1950) *Highway Capacity Manual; Practical Applications of Research.* U.S. Department of Commerce, Bureau of Public Roads United States Government Printing Office, Washington

Hénard, E. (1906) Carrefours a giration, in *Etudes sur les Transformations de Paris*, Libraires-Imprimeries Réunies, Paris, 1903-1908. New Edition: d'Equerre, Paris, 1982.

Hoogendoorn, S. P. (2005) Unified approach to estimating free speed distributions. Transportation Research Part B 39: 709-727.

Horst, Richard van der (1984) *The Demonstration cycle routes at The Hague and Tilburg; a behavioural study*, publication in Compendium of Technical papers, 54th Annual Meeting of the Institute of Transportation Engineers, 1984 september 23-27, p. 6.4- 6.8, San Francisco, 1984.

Horst, A.R.A. van der, M.C.L. Groenewoud, en M.H. Martens, E.C.J. Franx (2008) *Evaluatie geregelde turbopleinen.* TNO-rapport TNO-DV 2008 C006, TNO, Soesterberg.

Horst, Richard van der (2010) Weggebruiker centraal? Second opinion, *Verkeerskunde,* 2010, ANWB, Den Haag.

Janssen, W.H. (2003) De mens als informatieverwerkend systeem, *PAO cursus Ontwerpen van wegen en kruispunten*. Stichting Postacademisch Onderwijs, Delft.

Janssen, S.T.M.C. (2004) *Veiligheid op kruisingen van verkeersaders binnen de bebouwde kom.* Rapport R-2003-36 Stichting Wetenschappelijk onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

Kimber, R.M. and Marie C. Semmens (1977) *A track experiment on the entry capacities of offside priority roundabouts*. Supplementary Report 334. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Kimber, R.M. and Erica M. Hollis (1979) *Traffic queues and delays at raod junctions.* TRRL Laboratory Report 909. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Kimber, R.M. (1980) *The traffic capacity of roundabouts,* Laboratory Report 942. U.K Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, England.

Koornstra, M.J. (1991) Veiligheid in transportmodi; samenhang diversiteit en overdraagbaarheid, *Verslag Symposium 'Toekomstig transport', Veiligheid voorzien.* 21 mei1991. Eindredactie J. Stoop, en J.L. de Kroes, Vakgroep Veiligheidskunde, Technische Universiteit Delft

Kulmala, Risto (1995) *Safety at rural three- and four-arm junctions; Development and application of accident prediction model.* Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 233, Espoo.

Kyte, M., J.D Zegeer, and K.B. Lall, (1991) Empirical models for estimating capacity delays at stop-controlled intersections, *Intersections without Traffic Signals II* (W. Brilon, ed.). Springer-Verlag, Germany, pp 335-361.

Leeuw, Martijn. A.M. de, Hein Botma and Piet H.L. Bovy (1999) *Capacity of Single-Lane Roundabouts with Slow Traffic.* Transportation Research Record, no 1678, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

Leeuw, A.M. de (2001) Rotonde versus VRI-kruispunt, *Verkeerskunde,* 2001, 3, pp.62-67. ANWB, Den Haag.

Leeuw, A.M. de, en Th. H.J. Muller (2005) De VRI-Generator, nieuw verkeerskundig inzicht in verkeersregelingen. *Verkeerskundige werkdag 2005*, CROW, Ede.

Martens, M.H. (2001) *Rotondepijlen op voorsorteervakken: een begrijpelijkheidsstudie,* Rapport No. TM-01-C023, TNO Technische Menskunde, Soesterberg**.**

Maycock, G. and R.D. Hal (1984) *Accidents at 4-arm Roundabouts,* TRRL Laboratory Report 1120. Transport and Road Research Laboratory, Department of the Environment Department of Transport, Crowthorne, Berrshire, 1984. ISSN 0305 – 1293.

Michon, John A. (1989) Modellen van bestuurdersgedrag, *Handboek Sociale Verkeerskunde* (C.W.F.Knippenberg, J.A. Rothengatter en J.A Michon, eds.). Van Gorcum, Assen/Maastricht

Miller, A.J. (1972) Nine estimators of gap-acceptance parameters. In: *Proc. The Fifth International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation* (G.F. Newell, ed.), pp.215-235.

Minnen, J. van (1986) *Roundabouts, Some remarks on the safety and capacity of roundabouts and roundabout priori ty systems*, Rapport R-86-18. Stichting Wetenschappelijk onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, juni 1986 Leidschendam. (http://www.swov.nl/rapport/R-86-18.pdf).

Minnen, J. van (1990) *Ongevallen op rotondes; Vergelijking van de onveiligheid op een aantal locaties waar een kruispunt werd vervangen door een nieuwe rotonde*, Rapport R-90-47. SWOV, Leidschendam. (http://www.swov.nl/rapport/R-90-47.pdf).

Minnen, J. van (1991) Nieuwe rotonde ook veilig voor fietsers? *Verkeerskunde,* 1991, 10, ANWB, Den Haag.

Minnen, J. van en L. Braimaister (1994) *De voorrangsregeling voor fietsers op rotondes met fietspaden'*, Rapport R-94-73. SWOV, Leidschendam. (http://www.swov.nl/rapport/R-94-73.pdf).

Minnen, J. van (1995) *Rotondes en voorrangsregelingen*, Rapport R-95-58, SWOV, Leidschendam. (http://www.swov.nl/rapport/R-95-58.pdf).

Minnen, J. van (1997) *Rotondes en voorrangsregelingen II*, Rapport R-97/98-12, SWOV, Leidschendam. (http://www.swov.nl/rapport/R-98-12.pdf).

Minnen Jaap van (1999) Nut en noodzaak van uniformiteit, *Verkeerskunde,* 1999, 12, pp.38-67, ANWB, Den Haag.

Muller, Th.H.J. (1995) *Verkeersinfrastructuur, deel A: Verkeersbeheersing / verkeersregeltechniek.* Collegedictaat e25, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Infrastructuur, Sectie Verkeerskunde, TU-Delft, 1995.

Muller, Th.H.J., en P. Knoppers (2002) Ontwerp van verkeersregelingen, Delft Integraal, jaargang 2002, nr. 5, TU-Delft, pag.8 (aankondiging).

Muller, Theo, Thomas Dijker and Peter G. Furth (2004) Red Clearance Intervals: Theory and Practice, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board,* No 2130. Washington D.C.

Muller, Theo H.J. and Martijn de Leeuw (2006) New Method to Design Traffic Control Programs, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, No 2130, 2006, pp. 68-75. Washington D.C.

NRW (1999) *Empfelungen zum Einsatz und zur Gestaltung von Mini-Kreisverkehrsplatzen,* Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Technologie und Vekehr des Landes Nordrhein-Westfalen, Referat Öfentlichenkeitsarbeit, Haroldstraße 4 40213 Düsseldorf http://www.adfc-minden-luebbecke.de/ verkehrspolitik/KVP.pdf (geraadpleegd 29-2-2012).

Olson, P.L. and Sivak (1988) *Problems of Nighttime Visibility and Glare for Older Drivers,* SAE Technical Paper Series, University of Michigan, Transportation Research Institute, USA (geciteerd bij Summala, 2002).

Ostheimer, H. (2006) *Der Ostheimer, Handbuch für das Genehmigungs- und Erlaubnis-verfahren im Transportbereich.* ISBN: 978-3-921323-08-3, www.Lectura.de.

PZH (1971) *Verkeersveiligheid 1970*, Provincie Zuid-Holland, Den Haag, 1971

PZH (1993) *Kosten Duurzaam Veilig; consequenties voor provinciale wegen.* Provincie Zuid-Holland, Dienst Verkeer en Vervoer, Afdeling Ingenieursbureau, Bureau Verkeer. Den Haag, december 1993.

PZH (1994-2003) Jaarlijks rapport *Verkeersveiligheid provinciale wegen; evaluatie en verantwoording van veiligheidsprojecte.*, Provincie Zuid-Holland, Den Haag van 1994 t/m 2003.

PZH (1995) *Nota Planbeoordeling*. Provinciaal Bestuur Zuid-Holland, Den Haag.

PZH, (2001) *Kosten baten tweede fase duurzaam veilig provinciale wegen Zuid-Holland.* Gedeputeerde Staten van Zuid-Holland, Den Haag, 2001.

QDRM (1998) *Relationships between Roundabout Geometry and Accident Rates.* Queensland, Australia: Infrastructure Design of the Technology Division of Queensland Department of Main Roads, April 1998.

QDRM (2002) *Planning and Design Manual,* Chapter 14 *Roundabouts.* Queensland, Australia: Infrastructure Design of the Technology Division of QDMR. Meest recente versie te raadplegen: http://www.tmr.qld.gov.au/Business-industry/Technical-standards-publications/Road-planning-and-design-manual.aspx

Räsänen, Mikko and Heikki Summula (2000) Car Driver's Adjustments to Cyclists at Roundabouts. *Transportation Human Factors,* 2(1), pp.1-17, Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

Rasmussen, J. (1985) Trends in human reliability analysis. *Ergonomics,* 28, pp.1185-1195,

Rasmussen, J. (1987) Cognitive Control and Human Error Mechanism, in J. Rasmussen, K. Ducan and J. Leplat (eds) *New Technology and Human Error*, pp.53-62. Wiley, Chischester,.

RDW (2009) *Beleidsregel ervaringsfase ontheffingverlening LZV 2009*. http://wetten.overheid.nl/BWBR0026390 (geraadpleegd 27-4-2012).

Rosén, E, H. Stigson and U. Sander (2011). Literature review of pedestrian fatality risk as a function of car impact speed. *Accident Analysis and Prevention* 43 (2011), pp25-43.

RVV (1990) *Reglement Verkeersregels en verkeerstekens 1990,* Koninkrijk der Nederlanden Staatsblad 459, oktober 1990 en wijziging Staatsblad 268, 27 mei 1999.

Schepers, Paul en Berry den Brinker (2011) What do cyclists need to see to avoid single-bcycle crashes? *Ergonomics, Vol.54,* No 4, pp.315-327.

SETRA (1983) Carrefour Giratoires ―analyse de sécurité, Bagneux, en CEE-Ouest (1986) Evolution de la Sécurité sur le Carrefours Giratoires, Nantes (geciteerd bij Todd, 1986).

Siegloch, W. (1973) Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignal-steuerung. *Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 154*, Germany.

Simon, Michel J. (1991) Roundabouts in Switzerland. *Intersections without Traffic Signals II* (W. Brilon, ed.), pp.41-52. Springer-Verlag, Germany,

Sklenar, Jaroslav, *The M/M/1 Queuing System*, University of Malta, Msida Malta, website http://staff.um.edu.mt/jskl1/simweb/mm1.htm (geraadpleegd op 26-11-2011).

Spahn, V., G. Bäumler (2007) Sicherheit von Kreisverkehrsplätzen und Lichtzeichanlagen in Bayern. *Straßenverkehrstechnik,* 7, pp.357-362. Germany, 2007.

Staplin, L., K. Lococo & S. Byington, (1998) *Older driver highway design handbook* (FHWA-RD-97-135) Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Staplin, L., K. Lococo, S. Byington & D.L. Harkey, (2001) H*ighway design handbook for older drivers and pedestrians* (FHWA-RD-01-103) Department of Transportation DOT, Federal Highway Administration FHWA, Turner-Fairbank Highway Research Centre, TFHRC, McLean, VA, USA.

Steyvers, Frank J.J.M. (1999) Aspecten van gedrag op rotondes, Centrum voor Omgevings- en Verkeerspsychologie, Rijksuniversiteit Groningen, opgenomen in *Discussienota ten*

behoeve van de werkconferentie op 11 november 1999, Kennisplatform VERDI, Rotterdam, 1999.

Stuwe, Brigit (1991) Capacity and safety of roundabouts – German results. *Intersections without Traffic Signals II*, (W. Brilon, ed.), pp.1-12. Proceedings of an International Wokshop 18-19 July, 1991 in Bochum, Germany, ISBN 0-540-54180-2 Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Sullivan, D.P. and R.J. Troutbeck (1994) The use of Cowan's M3 headway distribution for modeling urban traffic flow. *Traffic Engineering + Control*, July/August 1994, pp.445 – 450.

Summala (2002) 'Behavioural Adaption and Drivers Task Control' in Fuller, R., J.A. Santos, ed. *Human Factors for Highway Engineers*. Elsevier Science Ltd, Amsterdam, pp.189-200.

SWOV (1992) *Naar een duurzaam veilig wegverkeer; Nationale Verkeersveiligheidsverkenning voor de jaren 1990-2010.* SWOV, Leidschendam, 1992. ISBN 9080100811, 9789080100817

SWOV (1998) *Veiligheid op wegen buiten de bebouwde kom; samenvatting van het OECD-rapport 'Safety strategies for rural roads' (1998) en toepassingsmogelijkheden voor de Nederlandse situatie*. SWOV, D-1998-11, Leidschendam. 1998. www.swov.nl/rapport/D-98-11.pdf (geraadpleegd 21-4-2012).

SWOV (2005) *Door met Duurzaam Veilig*. Eindredactie Fred Wegman en Letty Aarts. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam, 2005. http://www.swov.nl/rapport/DMDV/DMDV.pdf (geraadpleegd 21-4-2012).

SWOV (2010) *Achtergronden bij de vijf Duurzaam Veilg-principes, SWOV-Factsheet*. Leidschendam, februari 2010, http://www.swov.nl/rapport/Factsheets/NL/Factsheet_Duurzaam_Veilig_principes.pdf (geraadpleegd 21-4-2012).

SWOV (2012) *Rotondes, SWOV-Factsheet*. Leidschendam, januari 2012, http://www.swov.nl/rapport/Factsheets/NL/Factsheet_Rotondes.pdf (geraadpleegd 29-2-2012).

Tanner, J.C. (1962) A theoretical analysis of delays at an uncontrolled intersection, *Biometrika, 49*, pp.163-170. Great Britain.

Tanner, J.C. (1967). The capacity of an uncontrolled intersection. *Biometrika 54, (3,4)* pp.657-658. Great Britain.

Tanyel, Serhan and Nadir Yayla, (2003) A discussion on the parameters of Cowan M3 distribution for Turkey. Transportation Research part A 37 (2003) pp.129-143.

Thai Van, May-Jeanne and Pascal Balmefrezol (2000) The Design of Roundabouts in France: Historical context and State of the Art. Paper no 00-1337. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, No.1737. Washington, D.C., 2000, pp. 92-97.

Theeuwis, Jan (2002) 'Sampling information from the environment' in Fuller, R., J.A. Santos, ed. *Human Factors for Highway Engineers*, Elsevier Science Ltd, Amsterdam, pp.131-146.

Tingvall, C. & N. Haworth (1999). *Vision Zero; An ethical approach to safety and mobility*. In: Proceedings of the 6th ITE International Conference Road Safety and Traffic Enforcement; Beyond 2000, Melbourne, 6-7 September 1999.

Todd, Kenneth (1988) A History of Roundabouts in the United States and France, *Transportation Quarterly*, Vol. 42, No 4 October 1988, (599-623) Eno Foundation for Transportation, Inc., Westport, Connecticut.

Todd, Kenneth (1989) The roundabout, its history and development in Britain, *Highways and Transportation*, 36, 1, January 1989, pp.25-31. The Journal of the Institute of Highways and Transportation and The Institute of Highway Incorporated Engineers, London.

Todd, Kenneth (1991) A History of Roundabouts in Britain, *Transportation Quarterly*, Vol. 45, No 1 January 1991 (143-155). Eno Foundation for Transportation, Inc., Westport, Connecticut.

TRB (2007) *Roundabouts in the United States, NCHRP Report 572.* Transportation Research Board, Washington, DC, USA.

TRB (2010) *Roundabouts: An Informational Guide, Second Edition, NCHRP Report 672*. Transportation Research Board, Washington, DC, USA.

Troutbeck, R.J (1984) The theory of traffic flow on roundabouts, *Traffic Flow Theory. Esso Monash Short Courses in Traffic Sciences, pp.179-210* (geciteerd bij Hagring)

Troutbeck, R.J. (1986) Average Delay at an Unsignalized Intersection with Two Major Streams Each Having a Dichotomized Headway Distribution. *Transportation Science, 20 (4)*, pp.272-286.

Troutbeck R.J. (1989) *Evaluating the performance of a roundabout*. Special Report SR45, Australian Road Resarch Board, Nunawading (geciteerd bij Sullivan and Troubeck, 1994)

Troutbeck, R.J. (1993) Capacity and design of traffic circles in Australia. *Transportation Research Record 1398*, pp.68-74, Transportation Research Board, Washington, D.C. USA.

Troutbeck, Rod. J. and Werner Brilon (z.j.) Unsignalized Intersection *Theory*. *Revised Monograph on Traffic Flow Theory*, Chapter 8. Office of Research, Development, and Technology Department of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA), Washington, DC. USA. http://www.fhwa.dot.gov/ publications/research/operations/tft/chap8.pdf, update index.cfm: 23-3-2011.

Troutbeck, R.J. and S. Kako (1999). Limited priority unsignalized intersections, *Transportation Research,* A 33, pp.291-304.

V&W (1990) *Besluit administratieve bepalingen inzake het wegverkeer.* Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Den Haag, december 1990 (afgekort tot BABW)

V&W (1991) *Richtlijnen voor de bebakening en markering van wegen.* Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Den Haag, december 1991 (afgekort tot RBM-1991)

V&W (1994) *Wegenverkeerswet 1994.* Ministers van Verkeer en Waterstaat en Justitie, 's-Gravenhage, 21 april 1994. http://wetten.overheid.nl/BWBR0006622 (geraadpleegd 27-4-2012).

V&W (2009a) *Regeling voertuigen 2009*. Minister van Verkeer en Waterstaat, 's-Gravenhage, 10 april 2009 Laatst gewijzigd door de Minister van Infrastructuur en Milieu d.d. 11 oktober 2011. http://www.st-ab.nl/wettennr04/0352-108_Regeling_voertuigen.htm of http://wetten.overheid.nl/BWBR0025798 (geraadpleegd 27-4-2012).

V&W (2009b) *Roundabouts - Application and design; A practical manual.* Ministry of Transport, Public Works and Water management, Partners for Roads, file: B5381–01.001, registration number: VB/SE2008.0772.

Vasconcelos, A.L.P., A.B. Silva, Á.J.D.M. Seco, and J.P. Silva, Estimating The Parameters of Cowan's M3 Headway Distribution for Roundabout Capacity Analyses. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* [2011 accepted for publication].

Webster, F.V. (1958) *Traffic Signal Settings*. Road Research Technical Paper No. 39. Her Majesty's Stationery Office, London, 1958, reprinted with minor amendments, 1961.

Webster, F.V. and B.M. Cobbe (1966) *Traffic Signals.* Road Research Technical Paper No. 56. Her Majesty's Stationery Office, London.

Weijermars, W.A.M. (2001) *Voorrang aan veiligheid op rotondes,* Afstudeerscriptie Universiteit Twente, Enschede, september 2001.

Weinert, Antje (2001) *Grenz- und Folgezeitlücken an Knotenpunten ohne Lichtsignalanlagen.* Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität, Bochum, Heft 23, 1-05-2001.

Wesemann, P. (2000) *Kosten van de verkeersonveiligheid in Nederland, 1997*. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid (SWOV), Leidschendam.

Wolf, Peter M. (1968) *Eugène Hénard and the beginning of urbanism in Paris 1900-1914*. International Federation for Housing and Planning, Centre de Recherche d'Urbanisme. New York City, USA.

Wu, N. (1997) An Universal Formula for Calculating Capacity at Roundabouts. Arbeitsblaetter No.13, Institute for Traffic Engineering, Ruhr-University Bochum, Germany.

Wu, Ning (2003) Capacity Enhancement and Limitation at Roundabouts with Double-lane or Flared Entries. *Arbeitsblätter des Lehrstuhls für Verkehrswesen, Nr.25, Part B.* Ruhr-Universität Bochum, Germany.

Overzicht bijlagen op CD-ROM

Bijlage A	Begrippen, definities en symbolen	209 - 216
Bijlage B	Minirotonde	217 - 222
Bijlage C	Verkeerspsychologische aspecten	223 - 230
Bijlage D	Algemene ontwerpaspecten	231 - 250
Bijlage E	Ontwerp turboblockvarianten	251 - 266
Bijlage F	Capaciteitsmodel turborotondes	267 - 320
Bijlage G	Vergelijking verkeersprestatie turboplein met viertakskruispunt	321 - 342
Bijlage H	Onderzoek voorwegwijzers turboplein	343 - 358
Bijlage I	Ervaringen en belevingen van gebruikers	359 – 368

Curriculum vitae

Bertus Fortuijn is geboren te Hagestein op 4 januari 1945. In 1963 behaalde hij het diploma HBS-B aan het Christelijk Lyceum te Zeist, studeerde aan de Technische Hogeschool Delft en ontving, na het afleggen van het doctoraal examen van de studierichting der weg- en waterbouwkunde, in 1971 het diploma van civiel-ingenieur.

Ondertussen was hij op 12 augustus 1969 in het huwelijk getreden met Martine Johanna Neele. Samen kregen zij vier kinderen. Daarbij vormen – thans – een zestal kleinkinderen een bron van vreugde.

Na zijn afstuderen trad hij in dienst bij de provincie Zuid-Holland als stafmedewerker, met name belast met het begeleiden van vervoer- en verkeersstudies en van projecten gericht op de verbetering van de doorstroming van het openbaar vervoer.

In de periode 1987-2003 was hij hoofd van het bureau Verkeer. Tot de kerntaken van het bureau behoorden het verrichten van verkeersonderzoek, het geven van verkeerstechnische adviezen, het ontwikkelen van verkeersveiligheidsprojecten, het ontwerpen en beheren van verkeersregelinstallaties en het treffen van verkeersmanagementmaatregelen. Naast zijn managementtaak bleef hij zich ook voor de inhoudelijke aspecten van het vakgebied interesseren. Dit leidde op 3 oktober 1996 tot de ontdekking van de turbotonde. De uitdaging daarachter is beschreven in paragraaf 1.3. De directe aanleiding vormde de – begrijpelijke – conclusie in een scriptie van een afstudeerder aan de TU-Delft (Vincent Harte) dat er naast de enkelstrooksrotonde geen werkelijk veilige rotondeoplossing mogelijk was. De overtuiging dat dit niet waar *kon c.q. mocht* zijn, zette hem aan het schetsen.

Na 2003 richtte hij zich als strategisch beleidsadviseur meer op de inhoudelijke aspecten van het verkeerskundig vakgebied. In verband met zijn specifieke kennis op het gebied van turborotondes en turbopleinen, behoorde niet alleen de provincie Zuid-Holland tot zijn werkveld, maar werden ook adviezen aan andere overheden uitgebracht. Daarnaast verleende hij medewerking aan de totstandkoming van CROW-publicatie 257 *Turborotondes* (2008) en *Roundabouts – Application and design; A practical manual*, Ministry of Transport, Public Works and Watermanagement (V&W, 2009b) als bijdrage aan een internationaal samenwerkingsverband *Partners for Roads* op het gebied van kennisuitwisseling. Begin 2009 heeft hij het initiatief genomen om in het kader van de CROW-klankbordgroep *Bewegwijzering* de problematiek van het tijdig kunnen kiezen van de juiste rijstrook bij nadering van de turborotonde en het turboplein aan te kaarten. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van een nieuwe voorwegwijzer, die niet alleen informeert over de afslagrichtingen maar ook over de daarvoor te kiezen voorsorteerstroken, nog voordat de betreffende stroken zijn bereikt.

In het kader van de concentratie op de meer inhoudelijke aspecten van het vakgebied is hij sinds 2003 als gastdocent verbonden aan de TU-Delft, in het kader waarvan hij de voorbereiding van dit proefschrift ter hand heeft genomen.

Na zijn pensionering als ambtenaar is het verstrekken van verkeersadviezen aan overheden, adviesbureaus en particulieren verbreed, waartoe in 2010 Turbo Traffic Solutions te Zoetermeer is opgericht (www.turbotrafficsolutions.nl).

Beroepsmatige nevenactiviteiten

1977-1982: Docent verkeersonderzoek en -prognostiek aan de avond-HTS, opleiding verkeerskunde te Den Haag.

1983 -1989: Docent parttime opleiding voor het Hoger Planologisch Onderwijs te Utrecht.

1980: Gastdocent cursus 'Prognosemodellen voor personenvervoer' van de Postakademiale Vorming Verkeerskunde.

1996: Gastdocent SWOV-cursus 'Duurzaam-veilige infrastructuur buiten de bebouwde kom'.

1997, 1999: Gastdocent Postacademisch Onderwijs (PAO), cursus 'De bakens verzetten in het verkeersveiligheidsbeleid: Bevordering verkeersveiligheid op wegen buiten de bebouwde kom'.

1999: Gastdocent PAO Vervoerswetenschappen en Verkeerskunde, cursus Doelgroepen in verkeer en vervoer.

2000: Gastdocent DTV-studiedag Verkeerslichtenregelingen: Duurzaam veilige verkeerslichten.

2002 -2010: Gastdocent, belast met verzorgen van de opzet van de DTV-cursussen 'Meerstrooksrotondes' en 'Ontwerp Turborotondes'.

2003, 2005: Gastdocent PAO-cursus 'Ontwerpen van Wegen en Kruispunten' voor het onderdeel 'Verkeersproces op niet-autosnelwegen buiten de bebouwde kom'.

2003 - heden: Verkeerskundige advisering overheden en adviesbureaus, tot 2010 als medewerker van de provincie Zuid-Holland, na 2010 in het kader van Turbo Traffic Solutions.

Overige activiteiten:

1966 en later: Bestuursfuncties in studentenvereniging CSFR en reünistenvereniging RRQR.

1979 – 1980: Lid van de stichtingsraad van de Evangelische Omroep.

1980 – 1983: Lid algemeen bestuur van de Evangelische Omroep.

1983 – 2000: Algemeen adjunct bestuur van de Evangelische Omroep.

1983 – heden: Diverse bestuursfuncties bij 3xM.

1999 – 2008: Kerkenraadslid van een Hervormde gemeente te Zoetermeer.

Eervolle vermeldingen

2002: Het gemeentebestuur van Reeuwijk geeft de rotonde aansluiting N459-A12-noord de straatnaam: *ir. L.G.H. Fortuijnrotonde, bedenker van de turborotonde.*

2005: Oeuvreprijs voor de bijdragen aan de Verkeerskundige Werkdagen, vanwege 'de vernieuwende elementen, de uitgebreid beschreven analyse van de problematiek en de bruikbaarheid voor anderen'.

Publicaties van de auteur

Verkeerskundige publicaties vóór 1987

Een selectie

Fortuijn, L.G.H. (1974) Maatregelen tegen kop-staartbotsingen bij verkeerslichten, *Verkeerstechniek*, 1974, 2, ANWB, Den Haag, pp 60-66.

Fortuijn, L.G.H. en F. bn. Sloet tot Everlo (1974) Provinciale vervoers- en verkeersstudie Zuid-Holland, *Verkeerstechniek* 1974, 8 en 9, ANWB, Den Haag.

Fortuijn, L.G.H. (1976) Bereikbaarheid als vestigingsplaatsfactor, een alternatieve notatie voor Hamerslag's model, *Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 1976*

Fortuijn, L.G.H. (1979) Het logitmodel en de praktijk, discussiebijdrage aan *het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 1979.*

Fortuijn (1980) Bereikbaarheid en het geaggregeerde distributiemodel; een gedrags-theoretische interpretatie, bijlage 6 van onderdeel 24.E.1 'Provinciale vervoer- en verkeersstudie Zuid-Holland' van het cursusmateriaal van de cursus *Prognosemodellen voor Personenvervoer* van de Stichting Postacademiale Vorming Verkeerskunde, 1979-1980.

Hamerslag, R., L.G.H. Fortuijn, e.a. (1981) Een toepassing van binaire kalibratie in een regionale studie, *Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 1981*.

Publicaties na 1987

Fortuijn, L.G.H. en J.G.C.M. Paulussen (1992a): Een duurzaam veilige weginfrastructuur: waar gaat het dan om? Bijdrage aan de studiedag *Grenzen aan de snelheid*, Initiatiefgroep Wijs op Weg, Amersfoort, 7 mei 1992, pp.159 en 160

Fortuijn, L.G.H. (1992b) A sustainable safe road infrastructure; the start of the realization, *First World Congress on Safety of Transportation*, 26-27 November 1992, Delft., blz.76-86.

Fortuijn, L.G.H. (1992c) Duurzaam veilig verkeer: nu de praktijk, *Verkeerskunde*, 1992, 12, ANWB, Den Haag.

Fortuijn, L.G.H. (1993a) Naar een duurzaam verkeersveilig regionaal wegennet. *Verkeerskundige werkdagen 1993,* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (1993b) Wegvakken werkelijk duurzaam veilig inrichten? Kanttekening in *Verkeerskunde,* 1993, 12, blz. 16-17, ANWB, Den Haag.

Fortuijn, L.G.H. (1994b) Preventief beleid voor duurzaam veilig verkeer, Wegen 1994, 7, pp.10-15, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (1994c) Doordachte maatregelen gunstig voor duurzaam veilig verkeer, *Wegen 1994, 9*, pp.16-21, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. en D.T. Kramer (1995a) Wegcategorisering: relatie tussen ritduurcriterium; een bijdrage tot discussie, *Verkeerskundige werkdagen 1995,* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (1995b) Kencijfers veiligheid kruispunten, overwegingen voor een verklarend model voor de relatie tussen ongevallen en kruispunt-intensiteiten, *Verkeerskundige werkdagen 1995,* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (1995c) Stabiliteit van kencijfers verkeersveiligheid, voor verschillende schaalniveaus, *Verkeerskundige werkdagen 1995,* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. en Weijmans, G (1995d) Kosten en baten duurzaam veilig, *Verkeerskundige werkdagen 1995*, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. en H. Stok (1995e) Nog meer verkeer over de rotonde? *Verkeerskunde,* 1995, 12, p.16. ANWB, Den Haag.

Fortuijn, L.G.H. en V.F. Harte, (1997a) Meerstrooksrotondes: verkenning van nieuwe vormen, *Verkeerskundige werkdagen 1997,* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (1997b) Snelheidsbeheersingsproject N216, Evaluatie-periode 1993 t/m 1995, *Verkeerskundige werkdagen 1997,* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (1998) Speed control project N216 (Schoonhoven-Gorinchem), Period under evaluation 1993 - 1995, *Second World Congress on Safety of Transportation*, 18-20 February 1998, Delft.

Fortuijn, L.G.H. (1999) Uniformiteit schiet soms zijn doel voorbij, *Verkeerskunde,*1999, 12, p.48. ANWB, Den Haag.

Fortuijn, L.G.H. en P.J. Carton (2000a) Turbopleinen: een beproefd concept in een nieuw jasje, *Verkeerskundige werkdagen 2000,* CROW, Ede. (*Turbo circuits: A well-tried concept in a new guise.* www.pzh.nl/ onderwerpen/ verkeer en vervoer/ Turbo circuits, niet meer te raaplegen)

Fortuijn, L.G.H. (2000b) Rotonde-pijlmarkering, *Verkeerskundige werkdagen 2000,* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2000c) Verhoogde baanscheidingen op een twee-strooksrotonde; keuze tussen kans op aansprakelijkheid of veiligheid, *Verkeerskundige werkdagen 2000,* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2000d) Duurzaam veilige verkeerslichten, *Verkeerskundige werkdagen 2000*, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2000e). Verhoogde baanscheidingen op een twee-strooksrotonde; keuze tussen kans op aansprakelijkheid of veiligheid, *Verkeerskundige werkdagen 2000,* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2001a) Automatische voertuiggeleiding (AVG) bij verkeerslichten; een optie met perspectief, *Symposium Dynamisch Verkeersmanagement*, april 2001, ANWB, Den Haag.

Fortuijn, L.G.H. (2001b) Kosten-effectiviteitsanalyses van Verkeersmanagementprojecten, *Symposium Dynamisch Verkeersmanagement*, april 2001, ANWB, Den Haag.

Fortuijn, L.G.H. (2001c) Evaluatie van doelgroepenvoorzieningen, *Verkeerskundige werkdagen 2001,* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2001d) De stand van zaken van de turbo- en kluifrotonde, *Verkeerstechnische Leergang 2001,* ANWB, Den Haag, blz.31-42.

Fortuijn, L.G.H. (2003a) Turbopleinen met verkeerslichten; het geometrisch ontwerp. *Verkeerskundige werkdagen 2003*, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. en A.M. de Leeuw (2003b) Turbopleinen met verkeerslichten; verkeersregeling en –afwikkeling, *Verkeerskundige werkdagen 2003*, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. en P.J. Carton (2003c) Kosten baten tweede fase duurzaam veilig provinciale wegen in Zuid-Holland, *Verkeerskundige werkdagen 2003*, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H.(2003d) Explosieve groei van kop-staartbotsingen: wat doen we er aan? *Verkeerskundige werkdagen 2003,* CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2003e) Linksafvakken op kruispunten: met of zonder middengeleider?, *Verkeerskundige werkdagen 2003*, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2003f). Pedestrian and Bicycle-Friendly Roundabouts; Dilemma of Comfort and Safety, *Annual Meeting of the Institute of Transportation Engineers* in 2003 in Seattle, ITE, Washington D.C, USA.

Braimaister, L en Fortuijn, L.G.H. (2005) Wegverbreding en/of bermverharding van smallere provinciale wegen: wat is het belang voor de verkeersveiligheid? *Verkeerskundige werkdagen 2005,* B18, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H., P.J. Carton en B.J. Feddes (2005) Veiligheidseffect van kruispuntplateaus op gebiedsontsluitingswegen, *Verkeerskundige werkdagen 2005,* B20, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2005a) Veiligheidseffect turborotondes in vergelijking met enkelstrooks-rotondes, *Verkeerskundige werkdagen 2005,* B27, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2005b) Voorrangsregeling fietsers op rotondes; overzicht van gegevens uit Nederlandse studies sinds 2000, *Verkeerskundige werkdagen 2005, B52,* CROW, Ede.

Hansen, I.A. und L.G.H. Fortuijn (2006) Steigerung der Leistungsfähigkeit und Sicherheit von mehrspurigen Kreisverkehrsplätzen durch Spiralform, in *Straßenverkehrstechnik*, 2006, 1, pag. 37-42.

Fortuijn, L.G.H. en jhr. H.J.J. de Bosch Kemper (2006) Rotondes en turborotondes Over pijlen, strepen en stroken, in *Verkeersrecht,* 2006, 4, pag.101- 106, ANWB, Den Haag.

Fortuijn, L.G.H. en P.J. Carton (2007a) Meerstrooksrotondes en pijlmarkering (artikel 78 RVV), *Verkeerskundige werkdagen 2007*, B6, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. en P.J. Carton (2007b) Turbrotonde en pijlmarkering (artikel 76 RVV), *Verkeerskundige werkdagen 2007*, B7, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2007c) Nederlands Ontwerpvoertuig Trekker-opleggercombinatie niet Europees goedgekeurd; Enige kritische kanttekeningen bij CROW-publicatie164a. *Verkeerskundige werkdagen 2007*, B8, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2007d) Doorrijcurve en rammelstroken op rotondes; Enige kritische kanttekeningen bij CROW-publicaties 126 en 220, *Verkeerskundige werkdagen 2007*, B8b, CROW, Ede

Fortuijn, L.G.H. en A.S. van Beinum (2007e) Nieuwe inzichten in rotondecapaciteiten. *Verkeerskundige werkdagen 2007*, B9, CROW, Ede.

Baan, Dirk de, John Boender een Bertus Fortuijn. (2008) Turborotondes: een opkomend fenomeen; CROW brengt richtlijnen uit voor afweging, ontwerp en voorlichting. *Verkeerskunde 2008*, 3, ANWB, Den Haag.

Fortuijn, L.G.H. (2008) Turboplein maakt zijn naam waar. *Bijdragebundel Studiedag Verkeerslichtenregelingen 12 maart 2008*, DTV Consultants, Breda.

Fortuijn, Lambertus G.H. (2009a) Turbo Roundabouts: Design Principles and Safety Performance, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 2096*, pp.16-24.Washington, D.C., U.S.A.

Fortuijn, Lambertus G.H. (2009b) Turbo Roundabouts: Estimation of Capacity, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No 2130,* pp 83-92. Washington, D.C., U.S.A.

Fortuijn, L.G.H. (2009c) Bewegwijzering turborotondes: Introductie van de strookwisselwegwijze, *Verkeerskundige werkdag 2009*, bijdrage 5150802. CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2009d) Verbeterde bebording en markering turboplein, *Verkeerskundige werkdag 2009*, bijdrage 5150803 CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. en A.M. de Leeuw (2009e) Eenvoudige wachtrijformules voor een stationair verkeersproces, *Verkeerskundige werkdag 2009*, bijdrage 5150808. CROW, Ede.

Fortuijn, Lambertus G.H (2009a) Turbo Roundabouts: Design Principles and Safety Performance, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 2096*, Washington, D.C., 2009, pp.16-24.

Fortuijn, Lambertus G.H (2009b) Turbo Roundabouts: Estimation of Capacity, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No 2130,* Washington, D.C., 2009, pp 83-92.

Fortuijn, L.G.H. (2009c) Bewegwijzering turborotondes: Introductie van de strookwisselwegwijzer, Bijdrage 5150802 aan *Verkeerskundige werkdag 2009*, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. (2009d) Verbeterde bebording en markering turboplein, Bijdrage 5150803 aan *Verkeerskundige werkdag 2009*, CROW, Ede.

Fortuijn, L.G.H. en A.M. de Leeuw, (2009e) Eenvoudige wachtrijformules voor een stationair verkeersproces, Bijdrage 5150808 aan *Verkeerskundige werkdag 2009*, CROW, Ede.

Fortuijn, ir. L.G.H. (2010) Rotondes en kennisuitwisseling, Second Opinion, *Verkeerskunde,* 2010, 1, pp. 38-39. ANWB, Den Haag.

Fortuijn, Bertus en John Boender (2010) Nieuwe generatie bewegwijzering turborotondes en turbopleinen, weggebruik geeft nieuw inzicht. *Verkeerskunde 2010*, 03, pp. 32-37. ANWB, Den Haag.

Fortuijn, L.G.H (Bertus) (2011) Roundabouts in the Netherlands Development and experiences, *International Roundabout Design and Capacity Seminar*, 1st July 2011, Stockholm, website: http://www.nmfv.dk/PDF-filer/Vejnormalgruppen/Seminar_Stockholm_juli_2011/RDC_Netherlands_2.pdf (geraadpleegd 29-2-2012).

Fortuijn, L.G.H. (Bertus), en B.C. (Bob) Granneman, Rotonde-doseerinstallaties (RDI's) op robuustheid onderzocht, Bijdrage 55, *Nationaal Verkeerskundecongres 2011, Nieuwegein,* CROW & ANWB, november 2011.

TRAIL Dissertatiereeks

De hiernavolgende lijst bevat de meest recente diseraties in de TRAIL Thesis Series. Voor een totaaloverzicht van meer dan 100 titels, zie de TRAIL website: wwwrsTRAIL.nl. De TRAIL Thesis Series is een reeks van de Nederlandse TRAIL Research School on Transport and Logistics .

Fortuijn, L.G.H., *Turborotonde en turboplein: ontwerp, capaciteit en veiligheid*, T2013/1, January 2013, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Duin, R. van, *Logistics Concept Development in Multi-Actor Environments: Aligning stakeholders for successful development of public/private logistics systems by increased awareness of multi-actor objectives and perceptions,* T2012/6, October 2012, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Dicke-Ogenia, M., *Psychological Aspects of Travel Information Presentation: A psychological and ergonomic view on travellers' response to travel information,* T2012/5, October 2012, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Wismans, L.J.J., *Towards Sustainable Dynamic Traffic Management,* T2012/4, September 2012, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Hoogendoorn, R.G., *Swiftly before the World Collapses: Empirics and Modeling of Longitudinal Driving Behavior under Adverse Conditions*, T2012/3, July 2012, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Carmona Benitez, R., *The Design of a Large Scale Airline Network,* T2012/2, June 2012, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Schaap, T.W., *Driving Behaviour in Unexpected Situations: A study into the effects of drivers' compensation behaviour to safety-critical situations and the effects of mental workload, event urgency and task prioritization*, T2012/1, February 2012, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Muizelaar, T.J., *Non-recurrent Traffic Situations and Traffic Information: Determining preferences and effects on route choice,* T2011/16, December 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Cantarelli, C.C., *Cost Overruns in Large-Scale Transportation Infrastructure Projects: A theoretical and empirical exploration for the Netherlands and Worldwide*, T2011/15, November 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Vlies, A.V. van der, *Rail Transport Risks and Urban Planning: Solving deadlock situations between urban planning and rail transport of hazardous materials in the Netherlands,* T2011/14, October 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Pas, J.W.G.M. van der, *Clearing the Road for ISA Implementation? Applying adaptive policymaking for the implementation of intelligent speed adaptation*, T2011/13, October 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Zegeye, S.K., *Model-Based Traffic Control for Sustainable Mobility*, T2011/12, October 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Máhr, T., *Vehicle Routing under Uncertainty*, T2011/11, September 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Pel, A.J., *Transportation Modelling for Large-scale Evacuations*, T2011/10, July 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Zheng, F., *Modelling Urban Travel Times*, T2011/9, July 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Vlassenroot, S.H.M., *The Acceptability of In-vehicle Intelligent Speed Assistance (ISA) Systems: From trial support to public support*, T2011/8, June 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Kroesen, M., *Human Response to Aircraft Noise*, T2011/7, June 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Nielsen, L.K., *Rolling Stock Rescheduling in Passenger Railways: Applications in short-term planning and in disruption management*, T2011/6, May 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Qing, O., *New Approach to Fusion of Heterogeneous Traffic Data*, T2011/5, May 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Walta, L., *Getting ADAS on the Road: Actors' interactions in Advanced Driver Assistance Systems deployment*, T2011/4, April 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Lin, S., *Efficient Model Predictive Control for Large-Scale Urban Traffic Networks*, T2011/3, April 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Oort, N. van, *Service Reliability and Urban Public Transport Design*, T2011/2, April 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Mahmod, M.K.M., *Using Co-Operative Vehicle-Infrastructure Systems to Reduce Traffic Emissions and Improve Air Quality at Signalized Urban Intersections*, T2011/1, March 2011, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Corman, F., *Real-Time Railway Traffic Management: Dispatching in complex, large and busy railway networks*, T2010/14, December 2010, TRAIL Thesis Series, the Netherlands

Kwakkel, J., *The Treatment of Uncertainty in Airport Strategic Planning*, T2010/13, December 2010, TRAIL Thesis Series, the Netherlands