

(Bijdragenr. 55)

## Rotondedoseerinstallaties (RDI's) op robuustheid onderzocht

Auteur: Ir. L.G.H. (Bertus) Fortuijn,  
*Turbo Traffic Solutions*  
/  
*TU-Delft*

Co-auteur: Ir. B.C. (Bob) Granneman,  
*afstudeerder TU-Delft*

Bijdrage 55 Nationaal Verkeerskundecongres 2011

### **Korte samenvatting**

*RDI's verhogen de verkeersprestatie van een turborotonde: totaal met 5 à 10 % en de betreffende zijtak met 15 à 50 %. De wachttijd wordt nog sterker gereduceerd: totaal -15 à -55 % en op de maatgevende zijtak tot -60 %.*  
*Een doordacht detectiesysteem maakt de RDI geschikt voor wisselende belastingpatronen.*

## Inhoud

<b>1</b>	<b><i>Mogelijkheden verkeerslichten op kleine rotondes</i></b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b><i>Volledige verkeerslichtenregeling (afgekort tot vri)</i></b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b><i>Rotondedoseerlichten (ook als opvanglichten aangeduid)</i></b>	<b>3</b>
3.1	Werkingsprincipe	3
3.2	Plaats tweekleurige lantaarn	2
3.3	Plaats en functie detectoren	2
3.4	Duur van de roodtijd	4
3.5	Rotondedoseerlichten op enkelstrooks toeritten	5
3.6	Rotondedoseerlichten op tweestrooks toeritten	6
<b>4</b>	<b><i>Resultaat van een simulatie onder optimale condities</i></b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b><i>Gegevens van RDI's onder niet-optimale condities</i></b>	<b>7</b>
	<b><i>Literatuur</i></b>	<b>8</b>
	<b><i>Bijlage</i></b>	<b>9</b>

### **Samenvatting**

*Rotondes zijn te klein om voorzien te worden van permanent werkende verkeerslichten. Daarom worden op kleine rotondes incidenteel werkende rotondedoseerlichten toegepast. Op enkelstrooksrotondes bewerkstelligen ze alleen een eerlijker verdeling van de wachttijden. Maar op tweestrooksrotondes hebben ze de potentie om ook de verkeersprestatie van de rotonde te verhogen. Al in 2003 is dit door ir. A.M. de Leeuw aangetoond. In dit artikel wordt de theoretische achtergrond daarvan inzichtelijk gemaakt.*

*Ook worden algemene ontwerpprincipes voor RDI's afgeleid. Het wachttijd criterium biedt de basis voor een detectiesysteem, dat de RDI geschikt maakt voor wisselende belastingpatronen. Daarvoor is een combinatie van filedetectie en tellussen nodig.*

*Door de tweede auteur is in zijn afstudeerproject een onderzoek uitgevoerd naar de robuustheid van RDI's. Gevarieerd is met zowel het belastingpatroon als rotondetype. Gebruikt zijn twee typen turborotondes:*

- *Basis turborotonde*
- *Spiraaltrotonde.*

*Gebruik is gemaakt van een simulatiemodel dat het effect van een rotondedoseerlicht eerder onderschat dan overschat.*

*De resultaten laten zien, dat ook onder niet-optimale condities een RDI de verkeersprestatie van de gehele rotonde met ca. 5 à 10 % kan verhogen. De verkeersprestatie van de betreffende zijtak gaat sterker omhoog, met 15 à 50 %.*

*De afname van de verliestijd op alle takken samen is nog aanzienlijker: -15 à -55 % voor het totaal; op de maatgevende zijtak kan dat oplopen tot -60 %. Opvallend is, dat het doorbreken van een dominant belastingpatroon zelfs de wachttijd kan verlagen op de tak met het doseerlicht.*

## 1 Mogelijkheden verkeerslichten op kleine rotondes

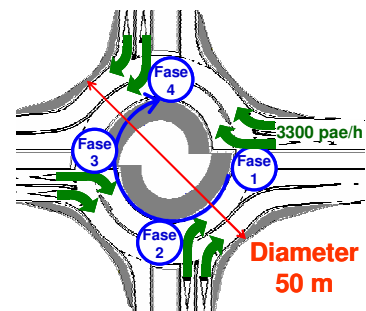
Als een rotonde een kleine diameter heeft (buitendiameter < 70 m) kunnen op de rotonde zelf zich geen wachtrijen opstellen. Alleen de volgende verkeersreelingen zijn dan mogelijk:

- volledige verkeerslichtenregeling met een tak-voor-tak-regeling;
- rotondedoseerlichten op de aanvoertakken.

## 2 Volledige verkeerslichtenregeling (afgekort tot vri)

Het nadeel van een tak-voor-tak-regeling is, dat steeds slechts één tak tegelijk groen licht heeft. De capaciteit van een groenlichtuur zal globaal overeenkomen met de oprijcapaciteit zonder verkeer op de rotonde. Deze bedraagt van één rijstrook ca. 1650 pae/h. Als de regeling met de klok mee draait, is het interne verlies minimaal. Afhankelijk van de rotondediameter kan die 0 seconde zijn. Dit betekent dat de capaciteit van een enkelstrooksrotonde met een tak-voor-tak-regeling 1650 pae/h is. Dit is veel lager dan op een enkelstrooksrotonde zonder een verkeerslichteninstallatie (ca. 2500 pae/h). Hierdoor zal bij plaatsing van verkeerslichten de capaciteit van een enkelstrooksrotonde afnemen.

Ook op een tweestrooksrotonde is zonder vergroting van de diameter alleen een tak-voor-tak-regeling mogelijk. Immers, de –noodzakelijke– verkeerslantaarns op de rotondesegmenten beperken de overlap in de groenfasen. Daarmee is de maximale capaciteit van een vri-rotonde met twee rijstroken nauwelijks hoger dan  $2 \times 1650 = 3300$  pae/h. Dit is ongeveer gelijk aan een turborotonde zonder vri. Het principe daarvan is weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1 Maatgevende capaciteit geregelde turborotonde met tak-voor-tak-regeling

## 3 Rotondedoseerlichten (ook als opvanglichten aangeduid)

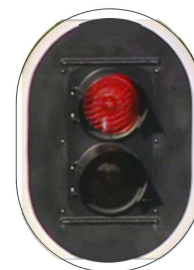
### 3.1 Werkingsprincipe

Rotondedoseerlichten op één of meer toevoertakken zijn een alternatief. Deze dienen alleen om de verkeersstroom op de tak met een dominante verkeersstroom even te onderbreken; de conflictafhandeling geschiedt op basis van de beoordeling door de verkeersdeelnemers. Voor alle duidelijkheid: op de rotonde zelf zijn dan geen verkeerslantaarns nodig. Omdat ze incidenteel in werking treden, worden rotonde-

doseerlichten uitgevoerd als tweekleurige verkeerslichten. Die kennen alleen een rood en een geel licht; het groene licht ontbreekt.

Daarbij moet worden opgemerkt, dat de werking van een rotondedoseerlicht op een geheel ander principe is gebaseerd dan een toeritdoseerinstallatie (afgekort tot TDI). Een TDI beoogt de hiaten tussen de invoegende voertuigen te vergroten (ont-clustering van het toeritverkeer) om terugstuwing op de autosnelweg – de weg waarop het verkeer voorrang heeft – te voorkomen.

Een rotondedoseerinstallatie (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 toevoertak. Met als gevolg een groepering van zowel de voertuigen als de hiaten op de rotonde. Daarom zijn ze ook wel als opvanglicht aangeduid.



*Figuur 2 Tweekleurige verkeerslantaarn*

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. Dan kan volstaan worden met een geelfase van 3 seconde.

### **3.2 Plaats tweekleurige lantaarn**

Vanuit een oogpunt van verkeersafwikkeling dient de afstand tussen rotondedoseerlicht en rotonde zo klein mogelijk te zijn. Verkeersveiligheidsoverwegingen bepalen de ondergrens van die afstand. 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 van 30 à 45 m tot de oversteek nodig, er van uitgaande dat een voetganger weliswaar langzamer is dan een fietser, maar eerder ziet wanneer een auto gaat rijden.

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 6 à 8 seconde en een optrekversnelling van  $1,5 \text{ m/s}^2$  is een afstand van 30 à 45 m tot de rotonde een te verdedigen keuze.

### **3.3 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 rotondedoseerlicht op de hoofdtak in werking bij filevorming 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 aansluitak bepalend. Nu is de relatie tussen wachttijd en wachtrijlengte afhankelijk van de afrijcapaciteit. Als bij benadering uitgegaan wordt van het M/M/1 wachtsysteem van Pollaczek-Khin(t)chin, is dit uit te drukken in een eenvoudige relatie (Fortuijn en De Leeuw, 2009):

Voor de lengte van de wachtrij wordt dan gevonden:

$$L_E = \frac{L_v \cdot C_E \cdot d_E}{3600} = \frac{C_E \cdot d_E}{600} \text{ [m]}$$

Hierin is:

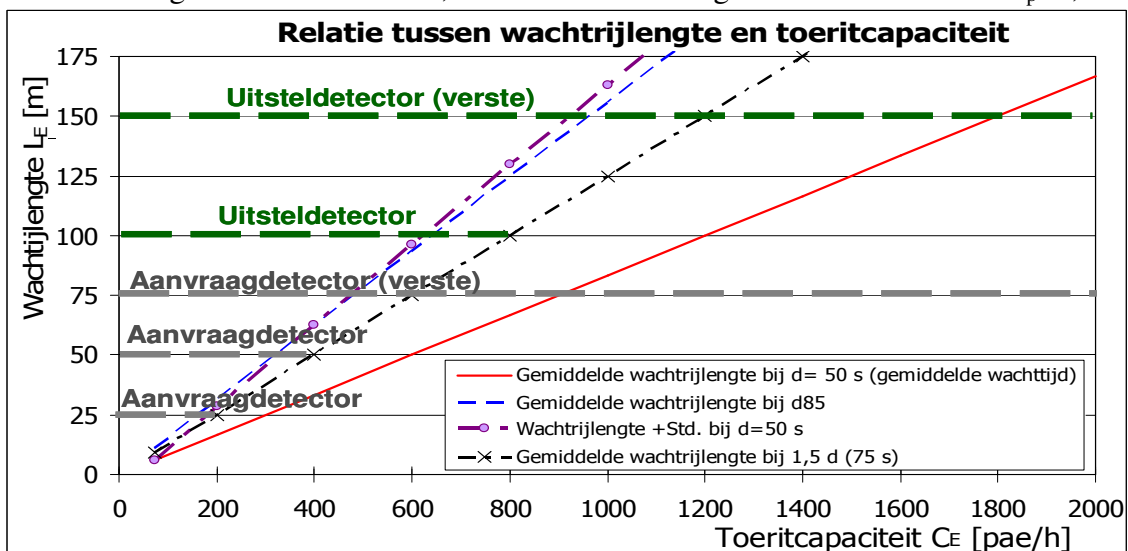
- $C_E$ : capaciteit toeritstrook (afhankelijk van de rotondebelasting) [pae/h]
  - $d_E$ : gemiddelde wachttijd op de rotondetoeritstrook [s/pae]
  - $N_E$ : gemiddeld aantal voertuigen in de wachtrij op de rotondetoeritstrook [#]
  - $L_v$ : gemiddelde afstand tussen voorkant-voorkant personenauto's in een wachtrij [m/pae]
  - $L_E$ : de gemiddelde lengte van de wachtrij op de rotondetoeritstrook [m]
- (Zie Bijlage)

Als criterium kan worden gehanteerd, dat voor de gemiddelde wachttijd geldt:  $d \leq 50$  [s/pae]. Nu vertonen de gemiddelde wachttijd en wachtrijlengte een spreiding. Voor de 85-percentiewaarde van de wachttijd geldt de relatie  $d_{85} = 1,9 \cdot d$ . De fluctuaties van de lengte van de wachtrij wijken daarvan iets af. Voor de standaardafwijking

daarvan geldt:  $\text{Std}[N_E] = \frac{\sqrt{\rho}}{(1-\rho)}$ . Hierin staat  $\rho$  voor de verzadigingsgraad:  $\rho = Q_E/C_E$ ,

met  $Q_E$ : toeritintensiteit. Uit het stelsel vergelijkingen is duidelijk dat de gemiddelde wachtrijlengte lineair gerelateerd is aan de toeritcapaciteit. Maar ook kan de daarbij behorende spreiding door een lineaire relatie worden benaderd.

Via simulatieberekeningen is een praktische startwaarde voor de instelling van de detectorconfiguratie vast te stellen, die in onderstaande grafiek is benaderd als  $d_p = 1,5 d$ .



Figuur 3 Detectoringreep bij wachtrijlengte gerelateerd aan toeritcapaciteit

Uit Figuur 3 is duidelijk dat niet uitgegaan kan worden van één bepaalde detectorafstand, maar dat een verder ontwikkeld detectiesysteem noodzakelijk is om optimale resultaten met een rotondedoseerlicht te bereiken. Een mogelijkheid is een

combinatie van een tellus bij de rotondetoerit met drie of meer filelussen. Afhankelijk van het aantal auto's dat gedurende de laatste 100 seconde 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 verst afliggende bezetlus op een rotondetak wordt niet begrensd.

### 3.4 Duur van de roodtijd

Bij een regulier verkeerslicht wordt de duur van de roodfase bepaald door zowel verkeersafwikkelingsaspecten als de verkeersveiligheid (ontruimingstijden). Bij een rotondedoseerlicht speelt het verkeersveiligheidsaspect een rol bij de plaats van het rotondedoseerlicht (zie par. 3.2). Voor de duur van de roodfase is alleen het verkeersafwikkelingsaspect 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. Het eenvoudigst is om uit te gaan van een vaste roodtijd. Deze is afhankelijk van de afstand van de aanvraagdetecter 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 aanvraagdetecter wordt geactiveerd. De oprijvolgtijd ( $t_F = 2,25$  s/pae) is dan bepalend voor de tijd die het kost om de wachtrij tussen aanvraagdetecter 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 rotondedoorrijnsnelheid  $v_r = 10$  m/s en een optrekversnelling  $a = 1,5$  m/s<sup>2</sup> bedraagt dat verschil  $t = v_r/a = 10/1,5 = 6,7$  seconde. Wel moet daar nog de tijd voor het benodigde hiaat ( $t_C = 4$  s) worden bijgeteld. Afhankelijk van de ligging van de aanvraagdetecter worden dan de instellingen verkregen uit Tabel 1.

**Tabel 1 Vaste roodtijden afhankelijk van positie aanvraagdetecter**

Formule vaste roodtijd: $RT_{vast.} = (L_{AD}/L_v) \cdot t_F + t_C - v_r/a_0$	
Afstand aanvraagdetecter tot rotonde	Vaste roodtijd
25 m	9,0 s
50 m	18,4 s
75 m	27,8 s

Wanneer 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 signaal 'geen file' van de bezetlus en het beëindigen van de roodfase wordt aangeduid door OT (overgangstijd). Voor de afleiding van de formules daarvan wordt verwezen naar de Bijlage. Het resultaat is weergegeven in Tabel 2. Daaruit blijkt, dat wanneer gebruik wordt gemaakt van de afmeldinformatie van een aanvraagdetecter 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 rotondedoseerlicht. Een alternatief is om in dat geval een vaste roodtijd uit Tabel 1 te hanteren. Bij afstanden van 50 m en groter

kan beter van de afmeldinformatie 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 detectormetwaarden op de hoofdtak.

**Tabel 2** *Berekende waarden overgangstijd tussen afmelding aanvraag-detector en doven rode licht*

Formule overgangstijd: $OT = T_{ZDS} - T_A - T_{HLS} + t_C$ (zie Bijlage)		
Afstand aanvraagdetector tot rotonde	Afstand rotodoseerlicht tot rotonde	
	30 m	45 m
	OT= tijd tussen detector-afmelding en doven doseerlicht	
25 m	-3,1 s	-4,6 s
50 m	1,6 s	0,1 s
75 m	6,3 s	4,8 s

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. Overigens bieden microsimulaties de mogelijkheid om de in te stellen overgangstijden en de toe te passen begrenzingen op een specifieke situatie af te stemmen.

### 3.5 Rotodoseerlichten op enkelstrooks toeritten

Op grond van theoretische overwegingen is het niet te verwachten dat een rotodoseerlicht de capaciteit van een enkelstrooksrotonde 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 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 enkelstrooksrotonde Schipluiden).

**Tabel 3** *Verloop van de som van de rotonde-intensiteit en toeritcapaciteit enkelstrooksrotonde (zonder doseerlicht)*

Intensiteit $Q_R$ op een segment van een enkelstrooksrotonde	1000	500	100
Gemeten $C_E$ capaciteit op de toerit	740	1160	1550
Som $Q_R + C_E$ [pae/h]	1740	1670	1650

Toch worden RDI's ook op enkelstrooksrotodes toegepast. Figuur 4 is daarvan een voorbeeld. Het belang daarvan is een herverdeling van wachttijden. Door een dominante verkeersstroom kunnen soms extreme wachttijden op de volgende tak ontstaan.



*Figuur 4 Rotodoseerlicht aansluiting Hoogerheide / Woensdrecht van de A58*

*(rond het jaar 2000 geïnstalleerd; later vervangen door een turborotonde)*

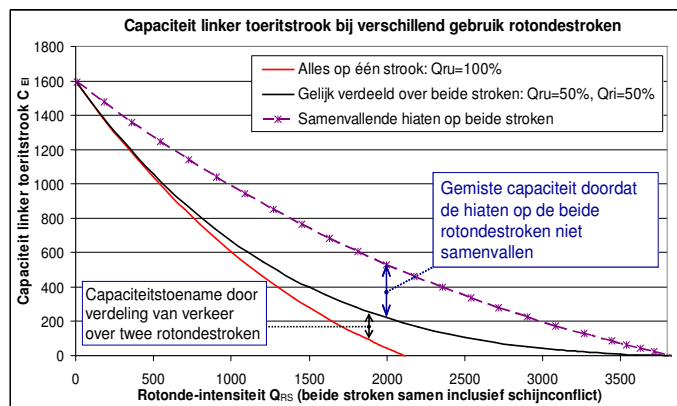


De herverdeling van wachttijden kan dan tot gevolg hebben dat de gemiddelde wachttijd op de benadeelde tak onder de grens van 50 seconden komt, zonder dat die op de dominante tak, voorzien van het tweekleurige licht, daar boven komt. Dan verbetert het afwikkelingsniveau, ook al wordt de verkeersprestatie van het maatgevende conflictvlak niet hoger.

### 3.6 Rotondedoseerlichten op tweestrooks toeritten

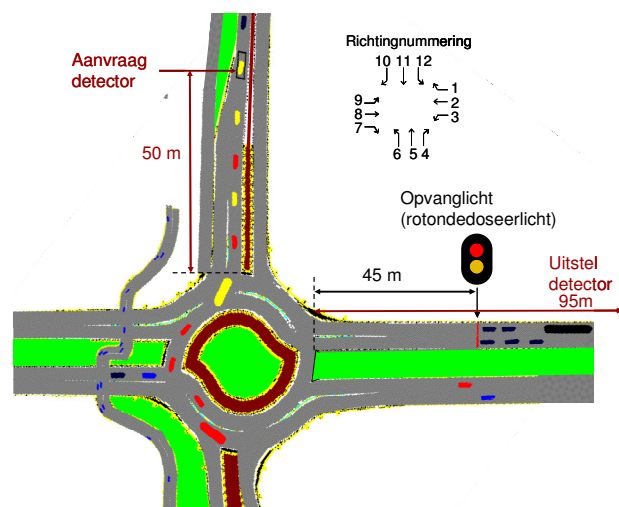
Op theoretische gronden mag verwacht worden, dat een rotondedoseerlicht op een tweestrooks toerit niet alleen een betere verdeling van de wachttijden kan bewerkstelligen, maar ook de capaciteit van de rotonde kan verhogen. Immers, om vanaf een toerit de binnenste rotondestrook op te rijden, is een hiaat in zowel de buitenste als de binnenste rotondestrook nodig. Wanneer het rotondeverkeer wordt geclusterd, worden de hiaten in beide stromen gelijktijdig geforceerd. Grafisch is dat theoretische effect in beeld gebracht in Figuur 5 (Fortuijn, 2009). 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: de verhouding tussen de waarden waarop de curve ‘Gelijk verdeeld over de rotondestroken’ en de curve ‘Alles op één strook’ de x-as snijden.

*Figuur 5 Effect van hiaatverdelingen op twee rotondestroken*



## 4 Resultaat van een simulatie onder optimale condities

De conclusie uit de vorige paragraaf is, dat een nadere verkenning van de mogelijkheden van een rotondedoseerlicht zeer de moeite waard is. Een microscopisch simulatiemodel is daarvoor een bruikbaar instrument. De eerste verkenningen zijn uitgevoerd in 2003 door ir. A.M. de Leeuw (Fortuijn, 2003a). Het rotondedoseerlicht op de hoofdtek is op 45 m voor de rotonde geplaatst met een vaste roodtijd van 20 s en de aanvraagdetecter op de zijtak 50 m voor de rotonde.



*Figuur 6 Voorbeeld situering van doseerlichten (RDI) op een tweestrooks aanvoertak van een turborotonde (Hogendorpweg, Rotterdam)*



Minimaal dooft het rode licht daarna dan 20 s, tenzij de uitsteldetector op 95 m bezet is. De begrenzing van de uitsteltijd van de deze detector op de hoofdtak is niet onderzocht: voor de gebruikte aanvoerintensiteiten was geen begrenzing nodig. De gebruikte configuratie is weergegeven in Figuur 6.

Gebruik is gemaakt van Vissim. Uitgegaan is van een onevenwichtig belastingpatroon. Zie Tabel 4. Het volume van de belastingen 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 richtingen 11 en 12 zijn qua invoer in Vissim zo zwaar belast dat op deze zijtak zonder RDI continu file optreedt, maar met RDI verwerkt konden worden met aanvaardbare wachttijden.

Uit Tabel 4 blijkt, dat bij een belasting van de hoofdtak rond 1280 pae/h (1350 pae/h inclusief schijnconflict) met een RDI de capaciteit van de zijweg van ca. 475 pae/h met 86 % toeneemt tot 884 pae/h.

**Tabel 4 Invoer en resultaten simulatie rotondedoseerlicht Hogendorpweg**

Conflictbelastingen ter hoogte van een zijtak op een turborotonde	Turborotonde <b>zonder</b> doseerlicht	Turborotonde met doseerlicht
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
<b>Capaciteit linker rijstrook oostelijke zijtak (ri. 11+12)</b>	<b>476 pae/h</b>	<b>884 pae/h</b>

Dit stemt overeen met de grafiek in Figuur 5. 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 toeneemt tot 2172 pae/h. Dat is een totale toename van 25%.

## 5 Gegevens van RDI's onder niet-optimale condities

In het gebruikte belastingpatroon van Tabel 4 is de invloed van andere conflicterende verkeersstromen buiten beschouwing gelaten. Verwacht mag worden dat vooral het rotondeverkeer dat de zijtak kruist terwijl het rotondedoseerlicht 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 rotondedoseerlicht gedoofd is, van invloed zijn op het uiteindelijke effect. Toch laten onderzoeken met uiteenlopende belastingpatronen positieve effecten van een rotondedoseerlicht zien. Akçelik (2008) rapporteert afgenomen filelengten.

De tweede auteur van dit artikel heeft berekeningen uitgevoerd met een simulatiemodel (Vissim), waarin parameters zijn gebruikt die een hogere capaciteit op een rotondetoerit laten zien (Granneman, 2011). Het effect van een rotondedoseerlicht wordt daardoor lager dan in de studie van De Leeuw: 67% capaciteitswinst voor de zijtak en 24 % voor het totale kruisingsvlak.

In de studie is gevarieerd met de belastingpatronen. Op de tak tegenover de zwaarst belaste hoofdtak bedraagt het verkeer 90 %. Evenals op de hoofdtak gaat hiervan 60%

recht door en slaat 20 % respectievelijk rechtsaf en linksaf. 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.

De simulaties zijn uitgevoerd voor zowel de basis turborotonde als de spiraalrotonde. Uiteraard laten de resultaten verschillen zien, maar in hoofdzaak vertonen ze hetzelfde beeld. Een RDI bewerkstelligde een verlaging van de wachttijden, variërend van 15 tot 55 % voor het totaal tot 60 % voor de maatgevende zijtak. Maar ook konden de belastingen in alle gevallen verder worden opgehoogd: alle takken samen met ca. 10 % en de zijtakken met 15 à 50 %. De theoretische winst uit Figuur 5 en Tabel 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. En 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 tijdswinst optreedt.

## Literatuur

- 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.
- DGP (2001) "Regeling Verkeerslichten", Directoraat-Generaal Personenvervoer, Ministerie van Verkeer en waterstaat, Den Haag.
- Fortuijn, L.G.H.(2003). "Turbopleinen met verkeerslichten; het geometrisch ontwerp". *Verkeerskundige werkdagen 2003*, CROW, Ede.
- Fortuijn, Lambertus G.H (2009). "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. en A.M. de Leeuw, (2009). "Eenvoudige wachtrijformules voor een stationair verkeersproces", *Bijdrage 5150808 aan Verkeerskundige werkdag 2009*, CROW, Ede.
- Granneman, Bob (2011). 'Effect van verkeerslichten op turborotondes'. Afstudeerscriptie CiTG, TU-Delft, mei 2011.

## Bijlage

### Formules relatie wachtrijlengte gemiddelde wachttijd

$$d_E = \frac{3600}{C_E - Q_E} \quad [\text{s/pae}] \quad (1)$$

$$N_E = \frac{C_E}{C_E - Q_E} \quad [\#] \quad (2)$$

Hieruit volgt:

$$N_E = \frac{C_E \cdot d_E}{3600} \quad (3)$$

En voor de lengte van de wachtrij wordt dan gevonden:

$$L_E = \frac{L_v \cdot C_E \cdot d_E}{3600} = \frac{C_E \cdot d_E}{600} \quad [\text{m}] \quad (4)$$

Terwijl voor de verzadigingsgraag  $\rho$  geldt:

$$\rho = 1 - \frac{3600}{d \cdot C} \quad (5)$$

Voor de eenvoud is in Figuur 3 geen rekening gehouden met de variatie van de lengte van personenauto-equivalenten in een wachtrij, zodat gebruik is gemaakt van de relatie:

$$\text{Std}[L_E] = \text{Std}[N_E] \cdot L_v = \frac{\sqrt{\rho}}{(1-\rho)} \cdot L_v \quad \text{Voor de benadering van de gemiddelde}$$

wachtrijlengte inclusief de standaardafwijking door een lineaire vergelijking geldt:

$L_{E,50} + \text{Std}[L_{E,50}] \approx 0,1673 \cdot C_E - 3,955$  met een  $R^2=1$ . Een benadering door een rechte door de oorsprong luidt:  $L_{E,50} + \text{Std}[L_{E,50}] \approx 0,1644 \cdot C_E$  met een  $R^2=0,9995$ . Dit is verantwoord.

Hierin is:

- $C_E$ : capaciteit toeritstrook bij de gegeven rotondebelasting voor de toerit [pae/h]
- $Q_E$ : intensiteit toeritstrook [pae/h]
- $d_E$ : gemiddelde wachttijd uitgedrukt in seconden per personenauto-equivalent [s/pae]
- $N_E$ : gemiddeld aantal voertuigen in de wachtrij [#]
- $L_v$ : gemiddelde afstand tussen voorkant-voorkant personenauto's in een wachtrij [m/pae]
- $L_E$ : de gemiddelde lengte van de wachtrij voor de rotondetoerit [m]
- $\rho$ : de verzadigingsgraad, waarvoor geldt:  $\rho = Q_E / C_E$

### Afleiding formules voor de overgangstijd

Voor de overgangstijd geldt:

$$OT = T_{ZDS} - T_A - T_{HLS} + t_C \quad (6)$$

$$\text{Voor } T_{ZDS} \text{ geldt: } T_{ZDS} = (L_{AD}/L_v) \cdot (t_F - t_B) \quad (7)$$

$$\text{En voor } T_{HLS} = (v_r / a_{\text{optrekken}}) + \{L_L - v_r^2 / (2 \cdot a_{\text{optrekken}})\} / v_r + t_R \quad (8)$$

indien  $\{L_L - v_r / (2 \cdot a_{\text{optrekken}})\} > 0$ , 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 rotondedooslicht moet doven. [s]
- $L_{AD}$ : afstand tussen rotonde en de betreffende aanvraaglus [m]

- $L_L$ : afstand tussen de stopstreep voor het rotondedoseerlicht en het conflictvlak op de rotonde tegenover de (volgende) zijtak waarvoor het rotondedoseerlicht in werking is gesteld [m]
- $L_v$ : afstand voorkant-voorkant personenauto's in stilstand = 6 m (praktijkmaat) [m]
- $T_{ZDS}$ : tijd tussen het moment waarop de auto op de aanvraagdetecter in beweging komt en het moment waarop deze de rotonde bereikt [s]
- $T_A$ : 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' [s]  
 $T_A = 2$  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/pae
- $t_F$ : oprijvolgtijd = 2,25 s/pae
- $t_B$ : 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 rotondedoseerlicht en start rijden automobilist
- $v_r$ : rotondedoorrijnsnelheid = 10 m/s.
- N.B. In deze benadering is de invloed van voertuigen vanaf de overige takken buiten beschouwing gelaten. Voertuigen die vanaf de tegenovergelegen zijtak linksaf slaan verhogen zowel  $T_{ZDS}$  als  $T_{HLS}$ . Uitsluitend de voertuigen die alleen de rotonde tegenover de hoofdtak passeren tijdens het in werking zijn van de RDI kunnen een kleinere overgangstijd mogelijk maken dan volgens de formules (6) t/m (8).  
 De voertuigen vanaf de tegenovergelegen zijtak linksaf beïnvloeden uiteraard wel de duur van de roodtijd van het doseerlicht, doordat het tijdstip van de afmelding van de filedetectie later plaatsvindt.

### *Uitsteltijd*

Analoog aan de berekeningen van  $T_{ZDS}$  voor de detectoren van de zijtak kan ook de tijd  $T_{HDS}$  van de detectoren op de hoofdtak berekend worden, waarmee de aanvraag voor een volgende roodfase vanuit de zijweg nog uitgesteld moet worden nadat de betreffende detector op de hoofdtak niet meer bezet is. Daarbij kan alleen gebruik worden gemaakt van de actueel gemeten volgtijden (al dan niet omgerekend naar  $q_E$  op de teldetector van de hoofdtakken (en niet van de oprijvolgtijd  $t_F$ ).

$$T_{HDS} = (L_{AD}/L_v) \cdot (1/q_{EH} - t_B)$$

Hierin is:

- $T_{HDS}$ : tijd tussen het moment waarop de auto op de uitsteldetector in beweging komt en het moment waarop deze bij benadering de rotonde bereikt [s]
- $q_{EH}$ : gemiddeld aantal voertuigen per strook dat op de tellussen van de hoofdtak voor de rotonde gemeten wordt, met uitzondering van de roodfase en  $T_{HSL}$  (of welke andere techniek daarvoor voorhanden is) [vtg/s].
- $t_B$ : Het is de vraag hoe groot  $t_B$  is als het om een wachtrij gaat van 100 à 150 m, zeker als de capaciteit  $C_E$  door kruisend verkeer wat meer beperkt wordt. Het verdient aanbeveling als er geen gegevens vanuit veldonderzoek beschikbaar zijn, hiernaar op zijn minste via simulaties verkenningen uit te voeren. Zolang dat niet voorhanden is, kan een benadering  $t_B = 0,5/q_E$  worden gehanteerd