

Invloed van rotondes op verkeersveiligheid. Overzicht van internationale onderzoeksresultaten en richtlijnen voor ontwerp.

S. Daniels, G. Wets

PROMOTOR ▶ prof. dr. G. Wets
ONDERZOEKSLIJN ▶ Infrastructuur en ruimte
ONDERZOEKSGROEP ▶ UHasselt, PHL, VUB, VITO
RAPPORTNUMMER ▶ RA-2006-77

**UNIVERSITAIRE CAMPUS
WETENSCHAPSPARK 5
B 3590 DIEPENBEEK**

T ▶ 011 26 91.12
F ▶ 011 26 91 99
E ▶ info@steunpuntverkeersveiligheid.be
I ▶ www.steunpuntverkeersveiligheid.be

Invloed van rotondes op verkeersveiligheid.

Overzicht van internationale onderzoeksresultaten en richtlijnen voor ontwerp.

RA-2006-77

S. Daniels, G. Wets

Onderzoekslijn Infrastructuur en ruimte



DIEPENBEEK, 2006.
STEUNPUNT VERKEERSVEILIGHEID.

Documentbeschrijving

Rapportnummer: RA-2006-77
Titel: Invloed van rotondes op verkeersveiligheid. Overzicht van onderzoeksresultaten en internationale richtlijnen voor ontwerp.

Auteur(s): S. Daniels, G. Wets
Promotor: prof. dr. G. Wets
Onderzoekslijn: Infrastructuur en ruimte
Partner: Universiteit Hasselt
Aantal pagina's: 65

Uitgave: Steunpunt Verkeersveiligheid, januari 2006.

Steunpunt Verkeersveiligheid
Wetenschapspark 5
B-3590 Diepenbeek

T 011 26 91 12
F 011 26 91 99
E info@steunpuntverkeersveiligheid.be
I www.steunpuntverkeersveiligheid.be

Samenvatting

Dit rapport is de neerslag van een literatuuronderzoek naar internationale richtlijnen en onderzoeksresultaten over het ontwerp van rotondes en hun invloed op de verkeersveiligheid. Na een afbakening van het begrippenkader en een situering van rotondes binnen de Belgische wetgeving worden de voornaamste geometrische elementen van een rotonde besproken. Daarbij wordt de focus gelegd op het verband tussen een aantal ontwerp-elementen (zoals aantal rijstroken, diameter, verlichting, breedte middeneiland,...) van rotondes en de verkeersveiligheid. Ook specifieke voorzieningen voor fietsers, voetgangers, zwaar of uitzonderlijk vervoer en openbaar vervoer krijgen aandacht. Daarnaast komen ook enkele bijzondere rotondevormen zoals de turborotonde en de ovale rotonde aan bod.

Er wordt gebruik gemaakt van bestaande richtlijnen voor wegontwerp uit Vlaanderen, Wallonië, Nederland, Frankrijk, Groot-Brittannië en de Verenigde Staten. Waar duidelijke verschillen bestaan tussen buitenlandse en Vlaamse ontwerpstandaarden worden deze aangegeven. Het is belangrijk deze verschillen voor ogen te houden als men richtlijnen voor wegontwerp of onderzoeksresultaten vanuit verschillende landen met mekaar wil vergelijken.

In dit rapport wordt niet ingegaan op de afwikkelingscapaciteit van rotondes. Wel wordt een overzicht gegeven van afwegingsfactoren die gebruikt kunnen worden om te bepalen of een rotonde een verantwoorde ingreep is op een kruispunt.

In een tweede deel van het rapport worden internationale onderzoeksresultaten naar de verkeersveiligheid op rotondes vergeleken. Daarbij wordt zowel gekeken naar de methodologie als naar de conclusies. Vanuit theoretisch standpunt wordt verklaard waarom rotondes een effect hebben op verkeersveiligheid. Er wordt stilgestaan bij trendeffecten en effecten van regressie naar het gemiddelde die invloed hebben op onderzoeksresultaten en waar vaak geen of te weinig rekening mee gehouden wordt. Zowel onderzoeksresultaten naar globale effecten van rotondes op de verkeersveiligheid komen aan bod, als specifieke onderzoeken naar de onveiligheid voor fietsers en voetgangers. Ook enkele onderzoeken die een verband zochten tussen ontwerpelementen en de verkeersonveiligheid worden behandeld.

Rotondes blijken een duidelijk positieve impact te hebben op de verkeersveiligheid. In Vlaanderen werd een daling vastgesteld van het aantal letselongevallen met gemiddeld 34% na aanleg van de rotonde. Rotondes hebben een groter effect op het aantal ongevallen met zwaardere afloop dan op ongevallen met lichtere afloop of op ongevallen met uitsluitend materiële schade. Ook voor voetgangers en fietsers lijken rotondes een gunstig effect te hebben, hoewel het effect onzeker is en alleszins kleiner dan voor andere categorieën weggebruikers.

Het rapport besluit met enkele aanbevelingen voor verder onderzoek en voor de omgang met rotondes in Vlaanderen.

English summary

This review describes international guidelines and research results about the design of roundabouts and their effects on traffic safety. Difference is made between roundabouts as they are defined in Belgian law and other types of intersections like traffic circles, rotary intersections or squares. The principal geometric elements (e.g. number of lanes, diameter, lighting, radius of the traffic island) of a roundabout are discussed in relation to traffic safety.

Attention is given to specific accommodation for bicyclists and pedestrians. In this review there were guidelines used from different countries: Belgium (Flemish and Walloon Region), the Netherlands, France, United Kingdom and the USA. At some points differences exist between recommendations and guidelines from different countries. If so, they are indicated. Those differences are important to take into account when one wants to compare guidelines either interpret research results.

Also some particular roundabout designs like the "turbo-roundabout" or the oval roundabout are treated.

This review doesn't aim to deal with capacity aspects of roundabouts. But some criteria are listed that could be used to determine whether a roundabout is an appropriate measure to improve the traffic situation at a particular intersection.

In the second part of the report international research results concerning roundabouts and effects on traffic safety are discussed. Some methodological aspects as well as conclusions from research are dealt with. There is explained why, also from a theoretical point of view, roundabouts have positive effects on traffic safety.

Effects of trend and regression to the mean do affect the results of studies, but they are rarely taken into account correctly.

The report describes research results about as well global effects of roundabouts on traffic safety, as specific results for bicyclists and pedestrians. Also some studies are treated in which the relationship between design elements and traffic safety was explored.

Roundabouts do have a positive impact on traffic safety. In Flanders-Belgium an average decrease of 34% of the number of injury accidents was noticed after construction of a roundabout. The more heavy the consequence of the accident, the higher the effects of roundabouts. Also for pedestrians and bicyclists roundabouts seem to generate positive safety effects. Nevertheless this effect seems to be insure and is probably smaller than for other road users.

Inhoudsopgave

1.	INLEIDING	8
2.	BEGRIPPENKADER	10
2.1	Rotonde	10
2.2	Plein	10
3.	GEOMETRISCHE ELEMENTEN VAN EEN ROTONDE	12
3.1	Middeneiland	14
3.2	Overrijdbare strook	14
3.3	Binnenstraal/-diameter	15
3.4	Buitenstraal/-diameter	15
3.5	Rijbaan en rijstroken	16
3.6	Markering rijstroken op de rotonde	16
3.7	Aansluitboog toerit/afrit	17
3.8	Toeritten en afritten	18
3.9	Bypass	18
3.10	Fietsvoorzieningen	18
	3.10.1 Type fietspaden	19
	3.10.2 Keuze van het type fietspad.....	21
	3.10.3 Aanvullende ontwerpprincipes.....	22
3.11	Voetgangervoorzieningen	24
3.12	Voorzieningen voor zwaar vervoer en uitzonderlijk vervoer	25
3.13	Openbaar vervoer	25
3.14	Dimensie	26
3.15	Bijzondere vormen	26
	3.15.1 Turborotonde	26
	3.15.2 Dubbele rotonde	27
	3.15.3 Kluifrotonde	28
	3.15.4 Ovale rotonde.....	28
	3.15.5 Minirotonde.....	28
3.16	Verlichting	29
4.	CONCLUSIES OVER DE GEOMETRISCHE KENMERKEN VAN ROTONDES.....	30
5.	AFWEGINGSFACTOREN BIJ DE KEUZE VOOR EEN ROTONDE	31
6.	VERKEERSVEILIGHEIDSEFFECTEN VAN ROTONDES	33
6.1	Theoretisch kader	33
	6.1.1 Conflicten	34
	6.1.2 Dubbelstrooksrotondes	36
	6.1.3 Fietsers en voetgangers	36

6.2	Classificatie van effecten	37
6.3	Voor- en na-onderzoek	38
6.4	Onderzoeksresultaten	39
	6.4.1 <i>Effecten op snelheid</i>	39
	6.4.2 <i>Effecten op conflicten</i>	40
	6.4.3 <i>Effecten op letselongevallen</i>	41
	6.4.4 <i>Effecten op ongevallen met uitsluitend materiële schade</i>	44
	6.4.5 <i>Invloed op onveiligheid voor fietsers</i>	44
	6.4.6 <i>Invloed op onveiligheid voor voetgangers</i>	47
	6.4.7 <i>Effecten naargelang de voorsituatie op het kruispunt</i>	47
	6.4.8 <i>Invloed van ontwerp- en omgevingselementen op de verkeersveiligheid</i>	48
7.	CONCLUSIES I.V.M. VEILIGHEIDSEFFECTEN	51
8.	AANBEVELINGEN	53
9.	GERAADPLEEGDE BRONNEN	54
10.	BIJLAGE 1: BEGRIPPENLIJST	57
11.	BIJLAGE 2: VERGELIJKENDE TABEL AANBEVELINGEN I.V.M. GEOMETRIE	59

Tabellen en figuren

Tabellen

<i>Tabel 1.</i>	De plaats van fietsers op rotondes (Vademecum Rotondes).....	23
<i>Tabel 2.</i>	De plaats van fietsers op rotondes (Vademecum Fietsvoorzieningen) ...	23
<i>Tabel 3.</i>	Veiligheidseffect van omvorming kruispunt tot rotonde.	42

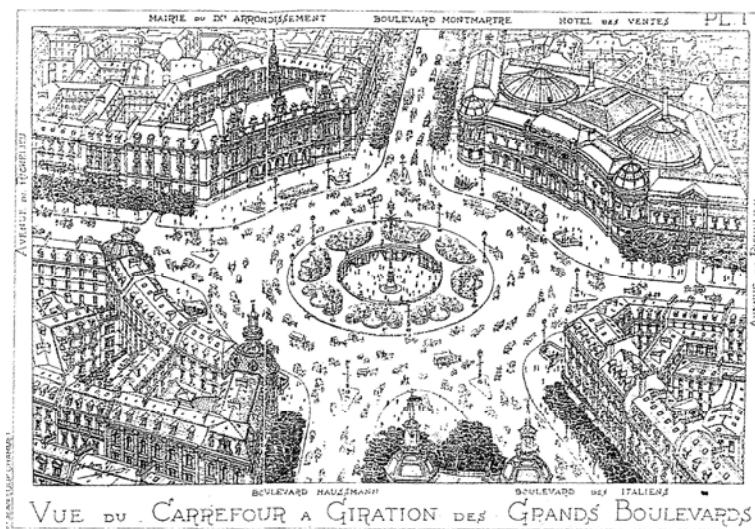
Figuren

<i>Figuur 1.</i>	Parijs. Kruispunt Richelieu-Drouot. Ontwerp nooit uitgevoerd.	8
<i>Figuur 2.</i>	Opbouw van een rotonde.	13
<i>Figuur 3.</i>	Rotonde met gemengde afwikkeling fietsers.....	19
<i>Figuur 4.</i>	Rotonde met fietsstrook.	20
<i>Figuur 5.</i>	Rotonde met vrijliggend fietspad in de voorrang.	20
<i>Figuur 6.</i>	Rotonde met vrijliggend fietspad uit de voorrang.	22
<i>Figuur 7.</i>	Turborotonde.	27
<i>Figuur 8.</i>	Britse dubbele rotonde.	28
<i>Figuur 9.</i>	Laterale verplaatsing op een rotonde.	34
<i>Figuur 10.</i>	Voertuigconflicten op enkelstrooksrotondes.....	35
<i>Figuur 11.</i>	Specifieke voertuigconflicten op dubbelstrooksrotondes.	36
<i>Figuur 12.</i>	Voertuig/voetgangersconflicten op een enkelstrooksrotonde.	37
<i>Figuur 13.</i>	Rotondes en effect op verkeersveiligheid – schematische weergave.....	38
<i>Figuur 14.</i>	Verband tussen laterale verplaatsing en de gemiddelde snelheid bij het oprijden van de rotonde.....	40

1. INLEIDING

Rotondes waren er in wezen al vooraleer de eerste auto bestond. Rotondes in hun huidige vorm zijn ontstaan uit de grote pleinen zoals ze in de negentiende eeuw in Frankrijk werden aangelegd op de voornaamste kruispunten in de grote steden. In 1903 bedacht de Parijse architect Eugène Hénard het principe van een kruispunt waarbij alle weggebruikers (voornamelijk paarden met kar) een rondgaande beweging moesten maken rond een obstakel in het midden (Figuur 1).

Figuur 1. Parijs. Kruispunt Richelieu-Drouot. Ontwerp nooit uitgevoerd.



Bron: CERTU (2000)

Algemeen gold de voorrang van rechts op de kruispunten met rondgaande beweging. Deze regel zorgde er evenwel voor dat het verkeer op het kruispunt (koetsen, karren, trams, voetgangers en fietsers) behoorlijk kon opgestropt geraken door de verplichting voorrang te verlenen aan het verkeer dat het kruispunt opreed. Later werd vooral in Groot-Brittannië ervaring opgedaan met rotondes en groeide de idee om het verkeer dat zich reeds op het kruispunt bevindt steeds voorrang te geven (Brown, 1995; CERTU, 2000; Thai & Balmefrezol, 2000). In Groot-Brittannië werd dit principe veralgemeend in 1966.

De rotondes zoals we ze tegenwoordig kennen, zijn in de jaren tachtig en negentig van de twintigste eeuw in Europa veralgemeend toegepast (Brilon & Vandehey, 2000; Brown, 1995; CERTU, 2000; Thai & Balmefrezol, 2000). In de Verenigde Staten kennen rotondes totnogtoe een eerder beperkte toepassing (Persaud et al., 2001).

Sinds de jaren negentig worden rotondes als inrichtingsvorm voor kruispunten ook in Vlaanderen algemeen toegepast. Op gewest- en provinciewegen alleen al liggen in Vlaanderen momenteel ongeveer 380 rotondes (bron: Administratie Wegen en Verkeer, digitaal bestand, 2004). Op alle wegen samen in Vlaanderen zouden momenteel 1715 rotondes liggen (bron: digitaal stratenbestand Multinet, Tele-Atlas, jaartal onbekend). In Wallonië lagen in 2000 ongeveer 500 rotondes (MET, 2003). In Nederland liggen momenteel 3.307 rotondes (AVV, 2005). In Frankrijk wordt het aantal rotondes geschat op 18.000 (CERTU, 2000).

Doel van dit literatuuroverzicht is om een overzicht te geven over de gekende en veronderstelde effecten van rotondes op de verkeersveiligheid. In een eerste deel wordt

daarbij het gehanteerde begrippenkader vastgelegd en komen de verschillende geometrische kenmerken van een rotonde aan bod. Daarna wordt meer in detail gekeken naar bestaande onderzoeksmethodes en onderzoeksresultaten over verkeersveiligheid op rotondes.

Dit literatuuroverzicht handelt in hoofdzaak over de veiligheidskenmerken die verbonden zijn aan rotondes. In de praktijk gebeurt de afweging tussen rotondes en andere kruispuntoplossingen echter niet alleen vanuit het standpunt van de verkeersveiligheid. Ook aspecten van leefbaarheid, doorstroming voor bepaalde verkeerssoorten, uniforme inrichting van wegvakken, stedenbouw, kostprijs, en zelfs esthetische elementen spelen een rol bij de keuze tussen een rotonde of een andere inrichting van een kruispunt. Deze aspecten komen niet of slechts beperkt aan bod in dit rapport.

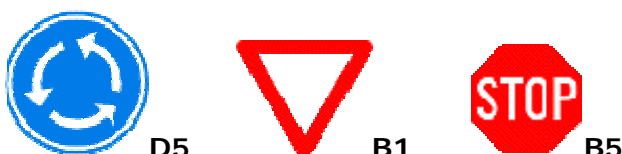
Voor de volledigheid en de vlotte leesbaarheid werd achteraan een verklarende begrippenlijst toegevoegd.

2. BEGRIPPENKADER

2.1 Rotonde

“Onder rotondes worden die verkeersvoorzieningen verstaan die duidelijk ingericht zijn als rondgaande rijbaan en ook als dusdanig gesignaleerd zijn. Noodzakelijke elementen in de inrichting zijn: een middeneiland, een buitenrand die cirkelvormig dient te zijn, kanalisering en markering op de aanvoerwegen” (Vanreusel, 1997).

Sinds 2003 is een rotonde als zodanig ook ingevoerd in de Belgische verkeerswetgeving. De wegcode definieert een rotonde als een “weg waarop het verkeer in één richting geschiedt rond een aangelegd middeneiland en gesignaleerd met verkeersborden D5 en waarvan de toegangswegen voorzien zijn van verkeersborden B1 of B5” (art. 2.39 K.B. 1/12/1975, ingevoerd door K.B. 4/4/2003).



Deze definitie werd van kracht op 1 januari 2004. Voordien werd het begrip rotonde als dusdanig niet gedefinieerd in de wegcode. Dit had voor gevolg dat rotondes in de praktijk ook op andere manieren gesignaleerd konden worden, bijvoorbeeld door middel van het bord D1 (Poté, 1997).



Verkeer op de rotonde heeft steeds voorrang. Nochtans is dit principe pas algemeen van kracht sinds 1 oktober 1997 (art. 12.3.1 K.B. van 1/12/1975, gewijzigd door K.B. van 11/03/1997). Tot op dat ogenblik was het toegelaten dat wegbeheerders de signalisatie op rotondes zodanig uitvoerden dat het verkeer op de rotonde zelf geen voorrang had en bijgevolg voorrang van rechts moest verlenen aan het toekomstige verkeer.

Sinds 1 januari 2004 mag de bestuurder op rotondes de rijstrook kiezen die het best aan zijn bestemming beantwoordt (art. 9.3. K.B. 1/12/1975, gewijzigd door K.B. 4/4/2003). Voordien was dit niet zo en moest de bestuurder zo dicht mogelijk bij de rechterraand van de rijbaan blijven.

2.2 Plein

Een **rotonde** is niet hetzelfde als een **plein** met rondgaand verkeer. Juridisch is een **plein** elke open ruimte, waarop een openbare weg uitkomt of meerdere openbare wegen samenkomen, en waar de plaatsgesteldheid het mogelijk maakt dat het verkeer en andere activiteiten er tezamen georganiseerd worden. Het plein is een openbare weg, onderscheiden van die welke er op uitkomen (art. 2.10 K.B. 1/12/1975). Een plein kan dus de vorm van een rotonde aannemen (indien wordt voldaan aan de definitie in art.

12.3.1 K.B. van 1/12/1975), maar dit hoeft niet noodzakelijk zo te zijn. Omgekeerd kan volgens de bovenstaande definities een rotonde in de meeste gevallen echter bezwaarlijk beschouwd worden als een plein, aangezien niet voldaan wordt aan de vereiste dat “de plaatsgesteldheid het mogelijk maakt dat het verkeer en andere activiteiten er tezamen georganiseerd worden”.

Een rotonde wordt vaak verkeerdelijk een rond punt genoemd (gallicisme). Rond punt is de letterlijke vertaling van ‘point rond’. In Frankrijk worden rotondes ook ‘carrefours giratoires’ genoemd. In het Engels spreekt men over ‘roundabouts’, in het Duits over ‘Kreisverkehrsplätze’, in het Spaans over ‘glorietas’ (Poté, Verbruggen, 2002).

3. GEOMETRISCHE ELEMENTEN VAN EEN ROTONDE

Een rotonde bestaat uit een aantal geometrische elementen die invloed kunnen hebben op de veiligheid of de verkeersafwikkeling: het middeneiland, de overrijdbare strook, de rijbaan, een fietspad en/of voetpad, middenbermen (zie Figuur 2). De maatvoering van deze elementen en hun onderlinge samenhang bepalen in grote mate de gebruikskennmerken van een rotonde. In binnen- en buitenland werden praktische ontwerprichtlijnen uitgewerkt over de maatvoering van de diverse bestanddelen van rotondes.

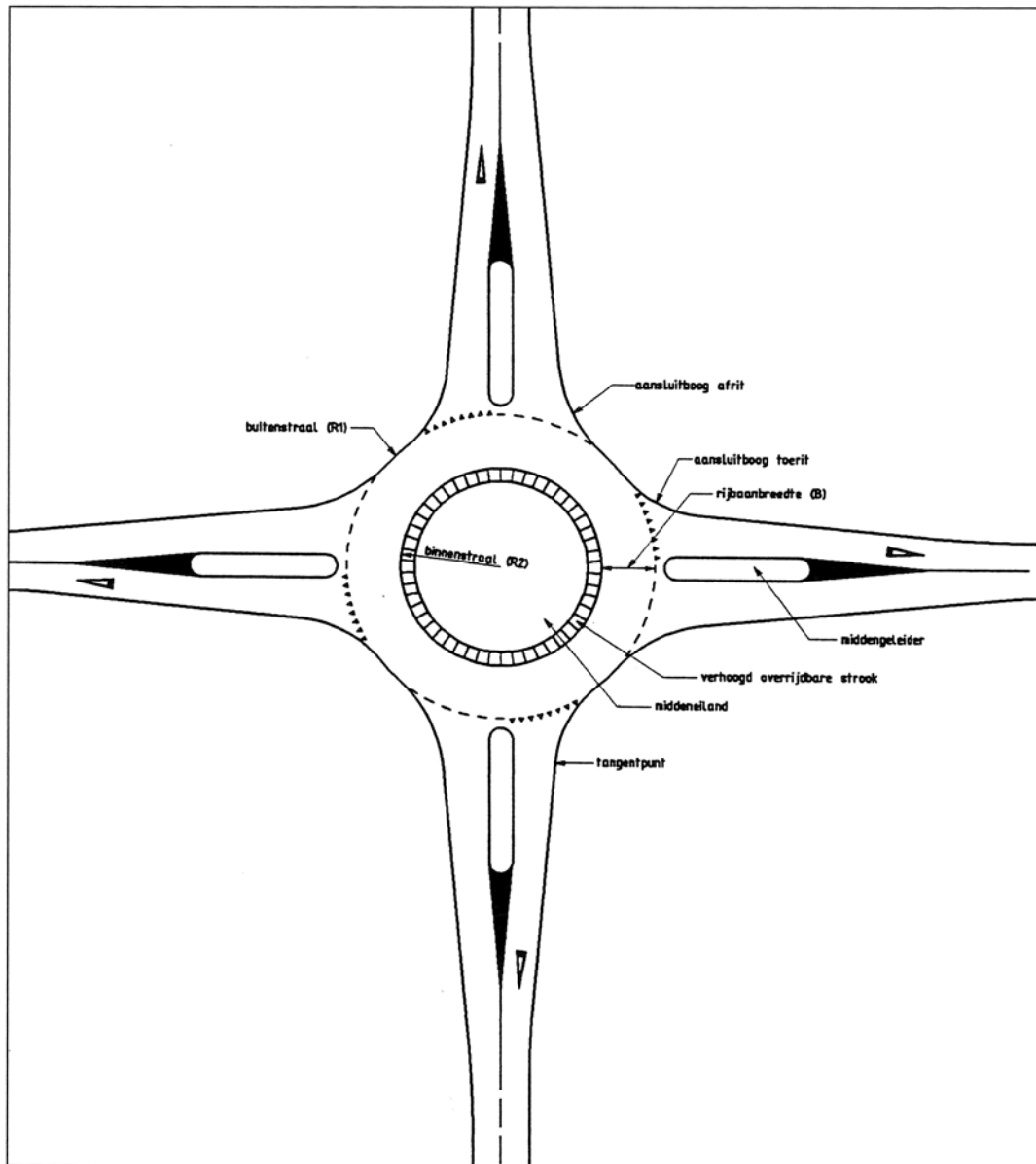
Hierna worden de verschillende geometrische elementen van een rotonde besproken. Daarbij ligt de focus op de invloed van deze elementen op de verkeersveiligheid. We baseren ons daarbij niet alleen op de bestaande ontwerprichtlijnen in Vlaanderen (voornamelijk het Vademecum Rotondes van de Administratie Wegen en Verkeer), maar ook op vergelijkbare documenten uit Wallonië en het buitenland (Nederland, Groot-Brittannië, Frankrijk en de Verenigde Staten). Waar relevant worden de verschillen tussen de verschillende landen aangeduid. In bijlage 2 worden de voornaamste elementen uit de verschillende ontwerprichtlijnen synthetisch weergegeven.

De uitdaging bij het ontwerp van een rotonde bestaat er in essentie in om een concept uit te tekenen dat in staat is om aan de vervoersvraag tegemoet te komen en een aantal factoren te minimaliseren: tijdverlies, aantal ongevallen en de kosten voor alle types weggebruikers (FHWA, 2000). Een goed aangelegde rotonde slaagt erin om een veilige kruising van verkeersstromen mogelijk te maken met een minimum aan tijdverlies (GBHA, 1993). Een bijkomend aspect dat daarbij een rol speelt is de aanleg- en onderhoudskost voor de wegbeheerder.

Enkele algemene principes bepalen de ontwerpkeuze van een rotonde. Deze principes komen in de verschillende ontwerprichtlijnen nagenoeg ongewijzigd terug, zij het dat nuances en klemtonen onderling kunnen verschillen:

- de **snelheid** van het verkeer vlak voor en op de rotonde moet voldoende laag zijn zodat de onderlinge snelheidsverschillen tussen de voertuigen die op de rotonde rijden zo laag mogelijk zijn. Hierdoor wordt de capaciteit optimaal benut (homogene verkeersstroom) en vermindert het risico op conflicten.
- het **ontwerpvoertuig**. Naargelang de verkeerskenmerken (bijvoorbeeld aandeel zwaar vervoer) van het kruispunt en mogelijk aanwezige wettelijke beperkingen (bv. route voor uitzonderlijk vervoer) is het nodig de dimensies van de rotonde (bochtstralen, rijstrookbreedte) aan te passen. Het ontwerpvoertuig voor een rotonde (ook wel maatgevend voertuig genoemd) moet daarom het grootst mogelijk voertuig zijn dat zich in normale omstandigheden op de rotonde kan begeven.
- de **niet-gemotoriseerde weggebruikers**. Al naargelang de omgevings situatie maken meer of minder fietsers, voetgangers, rolstoelgebruikers met een erg variërend niveau van verkeersbehendigheid (kinderen, jongeren, senioren,...) gebruik van een rotonde. De aard en het aantal van de niet-gemotoriseerde weggebruikers bepalen de noodzaak aan specifieke fiets- en voetgangersvoorzieningen.
- het **alignement** van de naderingen en de toegangen. Algemeen wordt een rotonde als optimaal beschouwd indien de aslijnen van alle aansluitende wegvakken dwars door het midden van de rotonde lopen. Indien het niet mogelijk is om de verschillende takken door het midden te laten lopen, wordt aanbevolen op te schuiven naar links, zodat in alle geval de snelheid van het naderende verkeer voldoende wordt geremd.

Figuur 2. Opbouw van een rotonde.



Bron: CROW (1998)

Naast deze algemene ontwerpprincipes zijn een hele reeks van specifieke ontwerpelementen van belang. Daarbij is niet zozeer de specifieke vormgeving van individuele elementen van belang, maar moet rekening gehouden worden met de onderlinge afhankelijkheid van al deze elementen. Bijgevolg is het de interactie tussen deze elementen die bepaalt of een rotonde uiteindelijk de gestelde veiligheids- en capaciteitsdoelstellingen haalt.

Belangrijk om weten is dat in elk van de bestudeerde landen eenzelfde voorrangregeling voor rotondes van toepassing is: het verkeer dat op de rotonde rijdt heeft voorrang ten opzichte van het verkeer dat de rotonde wil oprijden.

3.1 Middeneiland

Het middeneiland van een rotonde is de verhoogde, niet overrijdbare zone die volledig wordt omsloten door de rondgaande rijstrook (FHWA, 2000). Het middeneiland kan ook een overrijdbare strook omvatten. Het middeneiland is best cirkelvormig. Daardoor rijdt het verkeer op de rotonde met een constante snelheid en blijft het aantal uit te voeren stuurcorrecties - en het risico op controleverlies over het stuur - beperkt. Toch zijn ook afwijkingen ten opzichte van dit principe mogelijk, bijvoorbeeld bij ovale rotondes, zie 3.15.4 op pagina 28.

Het middeneiland dient steeds verhoogd te worden uitgevoerd. Dit zowel om esthetische als om functionele redenen (FHWA, 2000). Op minirotondes (zie verder) kan het middeneiland evenwel ook volledig vlak worden uitgevoerd. Belangrijk is dat het aankomende verkeer de aanwezigheid van de rotonde, vooral van het middeneiland, goed opmerkt. Een aangepaste verlichting is daarbij 's nachts aangewezen. De grootte van het middeneiland is een belangrijke geometrische variabele van een rotonde. Een groter middeneiland genereert een grotere deflectie (= laterale verplaatsing van het verkeer dat de rotonde oprijdt). Logischerwijze genereert een groot middeneiland ook een grotere rotonde. De aanwezigheid van beplanting of verticale elementen op het middeneiland verbetert de zichtbaarheid van de rotonde (GBHA, 1993; MET, 1999; CROW, 1998; Debaere & Vandeputte, 1997).

Als stelregel geldt dat het middeneiland wordt aangelegd op het convergentiepunt tussen de aslijnen van de verschillende takken van de rotonde. Op die manier is het middeneiland vanuit elke mogelijk rijrichting frontaal zichtbaar.

Nergens worden minimale of maximale maten voor het middeneiland opgegeven. Als de diameter van het middeneiland kleiner is dan 4 meter wordt over een minirotonde gesproken (Debaere & Vandeputte, 1997; GBHA, 1993).

3.2 Overrijdbare strook

Het middeneiland kan zodanig worden aangelegd dat het buitenste gedeelte licht verhoogd is en daardoor overrijdbaar is. Op kleinere rotondes wordt dergelijke overrijdbare stroken aangelegd om vrachtwagens en autobussen toe te laten om de rotonde vlot te berijden.

Principieel dient een rijstrook op een rotonde zo breed te zijn dat elk mogelijk toegelaten voertuig vlot over de rotonde kan rijden. Bij enkelstrooksrotondes met een kleine diameter kan dit er evenwel toe leiden dat de rijstrookbreedte die nodig is voor zwaar verkeer zodanig groot wordt dat de gewenste deflectie en de bijhorende

snelheidsverlaging bij personenwagens niet wordt gehaald. Dit kan worden opgevangen door het aanleggen van een overrijdbare strook rond het middeneiland.

Nadeel van een overrijdbare strook is dat het comfortniveau voor het zwaar verkeer daalt. Ook rijden 4X4-voertuigen er soms over, zijn ze een onverwacht obstakel voor motorrijders en kunnen ze verschuiving van ladingen in vrachtwagens veroorzaken (FHWA, 2000).

Een ideale overrijdbare strook is overrijdbaar voor vrachtwagens, maar vormt een voldoende obstakel voor personenwagens om het gebruik te ontmoedigen. De overrijdbare strook heeft daarom best een niveauverschil van 3 cm met het wegdek op de rijbaan.

In Vlaanderen wordt een breedte van 1,5 meter voor de overrijdbare strook – indien ze wordt voorzien – aanbevolen, ongeacht de dimensie van de rotonde (Debaere & Vandeputte, 1997). In Wallonië is dit hoger: 2 tot 4 meter. In de Verenigde Staten wordt een breedte van 1 tot 4 meter en een hellingsgraad (dalend vanuit het middelpunt naar de rand) van 3 tot 4% aanbevolen. De overrijdbare strook wordt best in een gekleurd of geprofileerd verhardingsmateriaal uitgevoerd zodat het verschil met het wegdek op de rotonde wordt beklemtoond.

3.3 Binnenstraal/-diameter

De binnenstraal is de afstand van het middelpunt van de rotonde tot aan de buitenkant van het middeneiland, inclusief de verhoogde overrijdbare strook (zie Figuur 2). De binnenstraal heeft een belangrijke invloed op de snelheid van de auto's op de rotonde. Een kleinere binnenstraal leidt tot hogere snelheden, omdat de laterale verplaatsing kleiner wordt. In elk van de onderzochte landen en regio's wordt er van uit gegaan dat de binnendiameter sterk kan variëren in functie van de configuratie van het kruispunt: we vinden waarden van 3 (minirotondes) tot 35 meter voor enkelstrooksrotondes. Voor meerstrooksrotondes kan de binnendiameter oplopen tot meer dan 60 meter.

3.4 Buitenstraal/-diameter

De buitenstraal is de afstand van het middelpunt van de rotonde tot aan de buitenkant van de verharding van de rijbaan (zie Figuur 2). Een vrijliggend fietspad wordt hier niet in meegerekend, een gemarkeerde fietsstrook of een aanliggend fietspad daarentegen wel.

De maatvoering van een rotonde is mee afhankelijk van het ontwerpvoertuig en van de omgevings situatie. De diameter moet voldoende groot zijn om het grootst mogelijke voertuig te laten passeren dat zich onder normale omstandigheden op de rotonde kan begeven. Anderzijds mag de diameter niet te groot zijn om de gewenste snelheidsreductie van het verkeer te verkrijgen. Bij kleinere rotondes kunnen deze doelstellingen verenigd worden door de aanleg van een overrijdbare strook die vooral gebruikt wordt door grote voertuigen. Voor uitzonderlijk vervoer kunnen bijkomende voorzieningen worden getroffen (zie 3.12 op p. 25).

Op de rotonde zelf moet gereden kunnen worden met een vaste rijlijn. Dat betekent dat er, behalve bij het op- en afrijden, op de rotonde zonder stuurcorrectie moet kunnen gereden worden. Ook variabele stralen in het middeneiland of de rijstroken worden best niet toegepast (CROW, 1998; FHWA, 2000; GBHA, 1993).

De gevonden waarden voor de buitendiameter variëren van 13 meter (minirotondes) tot 80 meter voor zeer grote meerstrooksrotondes.

3.5 Rijbaan en rijstroken

De **rijbaanbreedte** is de breedte van de rijbaan waarover in principe alle voertuigen onder alle omstandigheden de rotonde moeten kunnen passeren. De rijbaanbreedte is het verschil tussen de buiten- en de binnenstraal. (CROW, 1998)

De **rijstrookbreedte** is de breedte van de afzonderlijke rijstroken. Eén of meerdere **rijstroken** vormen samen met de eventueel aanwezige fietsstrook de **rijbaan**.

De breedte van de rijstroken op de rotonde moet in elk geval constant blijven over de volledige rotonde (CERTU, 1999).

Op een enkelstrooksrotonde wordt de rijstrookbreedte bepaald door het maatgevend voertuig. De rijstrook dient zo breed te zijn dat elk normaal voertuig vlot op de rotonde kan rijden. Bij dubbelstrooksrotondes is het maatgevend voertuig minder van belang. Hier wordt aanbevolen om de breedte van de breedste inkomende rijstrook ook op de rotonde zelf aan te houden (FHWA, 2000).

Als vuistregel geldt dat de breedte van de rijstroken op de rotonde zelf minstens zo groot moet zijn als de breedte van de rijstro(o)k(en) op het inkomende wegvak. Op rotondes met een kleiner middeneiland dient de rijbaanbreedte groter te zijn dan op rotondes met een groter middeneiland omwille van de benodigde draaicirkel voor de passerende voertuigen. In Frankrijk en de Verenigde Staten wordt als vuistregel gehanteerd dat de rijbaanbreedte op een enkelstrooksrotonde 120% dient te bedragen van de rijbaanbreedte op de toerit (CERTU, 1999; FHWA, 2000). In Frankrijk wordt een minimale breedte van 7 meter geadviseerd. 6 meter is mogelijk indien een overrijdbare strook wordt voorzien. In Vlaanderen bedraagt de aanbevolen rijbaanbreedte voor minirotondes 6 meter tegenover 5m voor grote enkelstrooksrotondes (Debaere & Vandeputte, 1997).

Voor dubbelstrooksrotondes wordt in de verschillende ontwerprichtlijnen een rijbaanbreedte van 8 tot 9 meter voorzien. Lauwers (1997) stelt dat vanaf een rijbaanbreedte van 8m de rotonde functioneert als een dubbelstrooksrotonde, zelfs indien er geen belijning tussen de rijstroken is voorzien.

De **verkanting** van de rijbaan op de rotonde dient tussen de 2 en de 2,5% te bedragen, afhellend naar de buitenkant (MET, 1999; CROW, 1998; FHWA, 2000). In Frankrijk is dit minder: tussen 1 en 2% (CERTU, 1999).

3.6 Markering rijstroken op de rotonde

Net zoals dat het geval is op rechte wegvakken, kunnen de verschillende rijstroken op een rotonde gescheiden worden door middel van een wegmarkering. Ook op een enkelstrooksrotonde is het principieel mogelijk om een concentrische markering aan te brengen die de voertuigen op de rotonde geleidt. In Frankrijk en de Verenigde Staten worden concentrische markeringen afgeraden omdat ze een vals gevoel van veiligheid geven (FHWA, 2000) of omdat ze nutteloos en zelfs storend zijn. Bijkomend nadeel is dat ze de weggebruiker verhinderen om het meest natuurlijke pad te volgen op de rotonde (CERTU, 1999). In Groot-Brittannië worden de concentrische markeringen bij grotere rotondes wel aanbevolen, omdat ze de capaciteit van de rotonde gunstig beïnvloeden. Daarnaast worden ze als veiliger beschouwd omdat ze onzeker gedrag bij de weggebruiker voorkomen (GBHA, 1997).

Bij meerstrooksrotondes worden rijwegmarkeringen toegepast om de verschillende rijstroken visueel te scheiden.

3.7 Aansluitboog toerit/afrit

De aansluitboog van de toerit is de overgangsboog tussen de toerit en de rotonde. De aansluitboog van de afrit is de overgangsboog tussen de rotonde en de afrit (CROW, 1998).

In Vlaanderen wordt, net als in Nederland, principieel gekozen voor toeritten die radiaal aansluiten op de rotonde (Lauwers, 1997). Met een radiale aansluiting wordt een min of meer haakse aansluiting van de toerit op de rotonde bedoeld. Daardoor moet elk voertuig dat de rotonde oprijdt een uitgesproken bochtig parcours volgen en wordt de snelheid sterk verlaagd. In het bijzonder voor fietsers wordt deze rotondevorm als voordelig aanzien. De benodigde ruimte voor een radiale rotonde is eveneens beperkter dan die voor een tangentiële rotonde. In Vlaanderen wordt de basisregel gehanteerd dat het verlengde van de rechterraand van de toerit de buitenrand van het middeneiland moet snijden of tenminste moet raken, zoniet ligt de toerit te tangentieel. Hetzelfde geldt in principe voor de afrit, al kan men hier wat toleranter zijn (Lauwers, 1997).

In Angelsaksische landen en op grote rotondes in Frankrijk bestaat een traditie van tangentiële aansluitingen van de toeritten op de rotonde. Hierbij gebeurt de aansluiting van de toerit op de rotonde volgens een vloeiende, tangentiële overgang die voor gevolg heeft dat het tijdverlies op de rotonde lager is en de rijsnelheid op de rotonde hoger is. Bij tangentiële aansluitingen is de snelheid van het verkeer dat de rotonde oprijdt ongeveer even hoog dan de snelheid van het verkeer dat reeds op de rotonde rijdt. (Lauwers, 1997; Brown, 1995; FHWA, 2000). In elk geval mag het verschil niet meer dan 20 km/u bedragen (FHWA, 2000).

Voordeel van tangentiële aansluitingen is dat de snelheden van het gemotoriseerde verkeer homogeen zijn, waardoor conflicten tussen sneller en trager voortbewegend verkeer vermeden worden en dat de capaciteit van de rotonde toeneemt. Voorstanders van radiale aansluitingen verwijzen dan weer voornamelijk naar de veiligheid van kruisende fietsers en voetgangers die bij tangentiële aansluitingen in het gedrang komt (Lauwers, 1997). Ook in de landen waar tangentiële aansluitingen worden toegepast, wordt beklemtoond dat de aansluiting er niet mag toe leiden dat de naderingssnelheid al te hoog wordt en dat de voorrangregels bij het oprijden van de rotonde niet worden gerespecteerd (FHWA, 2000; GBHA, 1993). In Groot-Brittannië wordt aanbevolen om de toeritten bij grote aantallen fietsers zonder uitwaaiering (= verbreding ter hoogte van de aansluiting op de rotonde waardoor vlotter de rotonde kan opgereden worden) aan te leggen waardoor meer haakse aansluitingen worden bekomen (GBHA, 1993).

De aanbevolen boogstralen voor de aansluiting van toeritten zijn het kleinst in Vlaanderen: 8 tot 12 meter (Debaere & Vandeputte, 1997). Wallonië houdt het iets ruimer: 10 tot 20m (MET, 1999). In de Verenigde Staten wordt een straal tussen de 10 en 30m aanbevolen (FHWA, 2000). In Groot-Brittannië wordt de boog van het natuurlijke pad (= boog die een maatgevend voertuig in werkelijkheid op de rotonde beschrijft) beperkt tot 100m. Dit stemt bij benadering overeen met een straal van de aansluitingsboog van maximaal 30 meter (GBHA, 1993). Het valt op dat de aanbevolen boogstralen weliswaar variëren van land tot land, maar vooral binnen de respectievelijke landen een grote variatie toelaten: de kleinste boogstralen in de Verenigde Staten zijn bijvoorbeeld kleiner dan de grootst mogelijke boogstralen in Vlaanderen. De bovenstaande waarden gelden voor de aansluitbogen van toeritten. Voor afritten worden iets ruimere waarden gehanteerd, waarbij als stelregel geldt dat de straal van de afrit nooit kleiner mag zijn dan de straal van de toerit (CERTU, 1999; FHWA, 2000; GBHA, 1993; MET, 1999; Debaere & Vandeputte, 1997).

3.8 Toeritten en afritten

De aanwezigheid van middengeleiders op de toeleidende wegvakken biedt voordelen op het vlak van veiligheid, capaciteit en wegbeheer (Lauwers, 1997). Voor fietsers en voetgangers maken ze een oversteek in 2 fasen mogelijk. Ze maken het naderende wegverkeer bovendien attent op de aanwezigheid van de rotonde. Een brede middengeleider geeft het toekomende verkeer bovendien de kans om in te schatten of het tegemoetkomende verkeer op de rotonde blijft rijden dan wel de rotonde verlaat. Daardoor verkleinen de wachttijden en vergroot de capaciteit van de rotonde. Tot slot zijn middengeleiders een ideale opstelplaats voor bewegwijzering. In Vlaanderen worden middengeleiders aanbevolen voor rotondes met een middeneiland van 15m diameter of hoger (Debaere & Vandeputte, 1997), in Nederland vanaf 16m diameter. In Frankrijk wordt aanbevolen steeds middengeleiders te voorzien van minimaal 0,8m en bij voorkeur 2m op rotondes in stedelijke omgeving (CERTU, 1999). In Groot-Brittannië wordt het de ontwerper vrij gelaten om al dan niet middengeleiders te voorzien (GBHA, 1993).

De Amerikaanse FHWA stelt dat de breedte van de inkomende wegvakken de voornaamste determinant is voor de capaciteit van een rotonde. Het aantal rijstroken is minder van belang (FHWA, 2000). Uit veiligheidsoverwegingen mag de breedte van de inkomende rijstrook echter niet te groot zijn. Hierin treedt bijgevolg een trade-off-effect op tussen veiligheid en capaciteit.

Uit het oogpunt van veiligheid verdienen toeritten en afritten op één rijstrook de voorkeur (Lauwers, 1997; MET, 1999). Zelfs bij een 2X2-rijweg worden toerit en afrit best tot één rijstrook herleid, indien de intensiteiten dit toelaten. Enkel indien dit noodzakelijk is omwille van capaciteitsredenen kan er naar toeritten of afritten op twee rijstroken gegaan worden. Ook elders wordt aanbevolen om het aantal rijstroken 'zo klein mogelijk' te houden (CERTU, 1999; GBHA, 1993; FHWA, 2000).

In Vlaanderen wordt voor toeritten met één rijstrook een voorkeursbreedte van 3,2 tot 4 meter gehanteerd (Debaere & Vandeputte, 1997). Wallonië (4m), Nederland (3,5-4m) en Frankrijk (3-4m) hanteren vergelijkbare waarden. In de Verenigde Staten worden iets bredere toeritten aanbevolen (4,3 tot 4,9 m).

3.9 Bypass

In sommige gevallen is het mogelijk een rotonde op één of meerdere takken uit te rusten met een extra strook voor rechtsafslaand verkeer ("by-pass") die toelaat om een manoeuvre uit te voeren buiten de rotonde om. Een dergelijke ingreep kan interessant zijn om capaciteitsproblemen op specifieke takken op te lossen. Door de te verwachten hoge rijksnelheden in de bypass wordt in Nederland afgeraden hier fietsers gelijkgronds te laten oversteken (CROW, 1998). Een andere mogelijkheid bestaat erin om ter hoogte van de fietsoversteek over de bypass een verhoogde inrichting aan te leggen waardoor de snelheid van het gemotoriseerde verkeer wordt afgeremd.

3.10 Fietsvoorzieningen

Vooraf in de Nederlandse aanbevelingen wordt veel aandacht besteed aan fietsvoorzieningen op rotondes. De Vlaamse ontwerprichtlijnen zijn grotendeels gebaseerd op de Nederlandse.

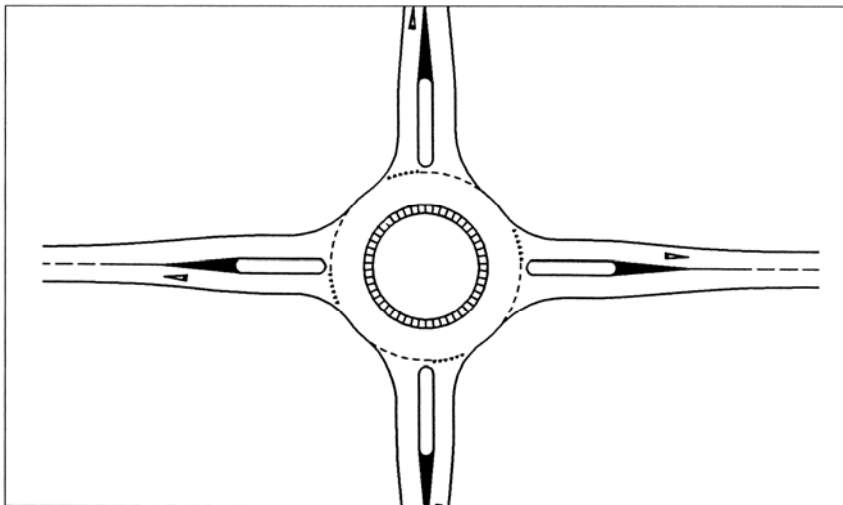
3.10.1 Type fietspaden

Er bestaan 4 manieren om fietsers over rotondes te leiden: volledig ongelijkgronds, via een vrijliggend fietspad, via een aanliggend fietspad, en over dezelfde rijweg dan het gemotoriseerd verkeer (= gemengd verkeer) (CROW, 1998; Lauwers, 1997).

a. Gemengde afwikkeling

Wanneer de fietsers gebruik maken van dezelfde rijweg dan het gemotoriseerde verkeer, wordt gesproken over een gemengde verkeersafwikkeling. In dat geval wordt aanbevolen de rijbaanbreedte beperkt te houden waardoor motorvoertuigen de fietser niet kunnen inhalen (Lauwers, 1997).

Figuur 3. Ronde met gemengde afwikkeling fietsers.

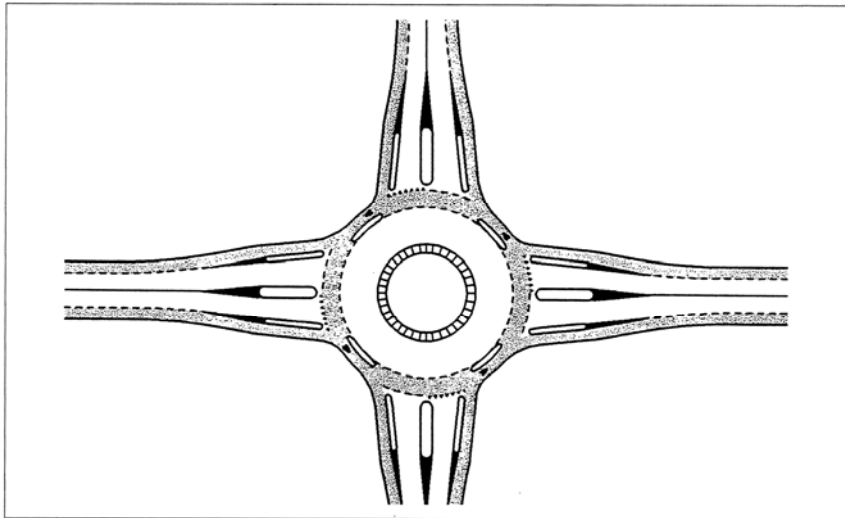


Bron: CROW (1998)

b. Ronde met fietsstrook

Het fietspad is aanliggend ten opzichte van de rijweg en is enkel gescheiden door middel van een markering. Lauwers (1997) raadt deze oplossing af omwille van de conflictsituaties - vooral met vrachtwagens - ter hoogte van de toeritten en de afritten. Ook in Nederland wordt deze oplossing afgeraden: onnodig bij lage intensiteiten en te onveilig bij drukker verkeer.

Figuur 4. Rotonde met fietsstrook.

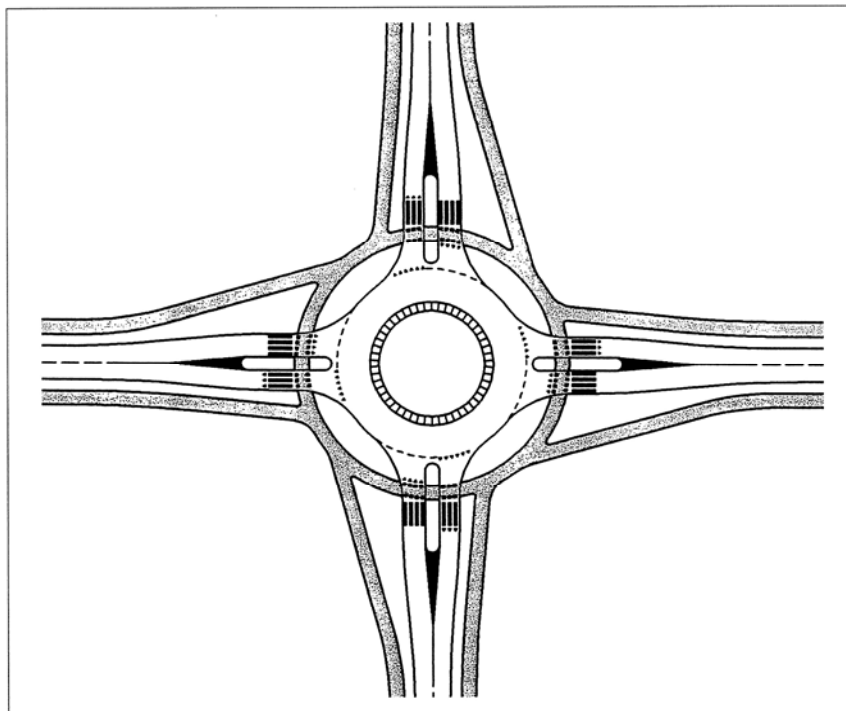


Bron: CROW (1998).

c. Vrijliggend fietspad

Bij een rotonde met een vrijliggend fietspad is er een scheiding tussen de rijweg en het fietspad. Het is belangrijk dat het fietspad volledig evenwijdig rondom de rotonde loopt (CROW, 1998).

Figuur 5. Rotonde met vrijliggend fietspad in de voorrang.



Bron: CROW (1998).

d. Volledig gescheiden afwikkeling

In de regel gebeurt de verkeersafwikkeling voor de fietsers gelijkvloers op de rotonde. Bij grote rotondes met dubbele toe- en afritten, in verkeersgebieden, is de ongelijkgrondse kruising van fietswegen met de rotonde - die dan voorbehouden wordt aan het autoverkeer - aan te bevelen.

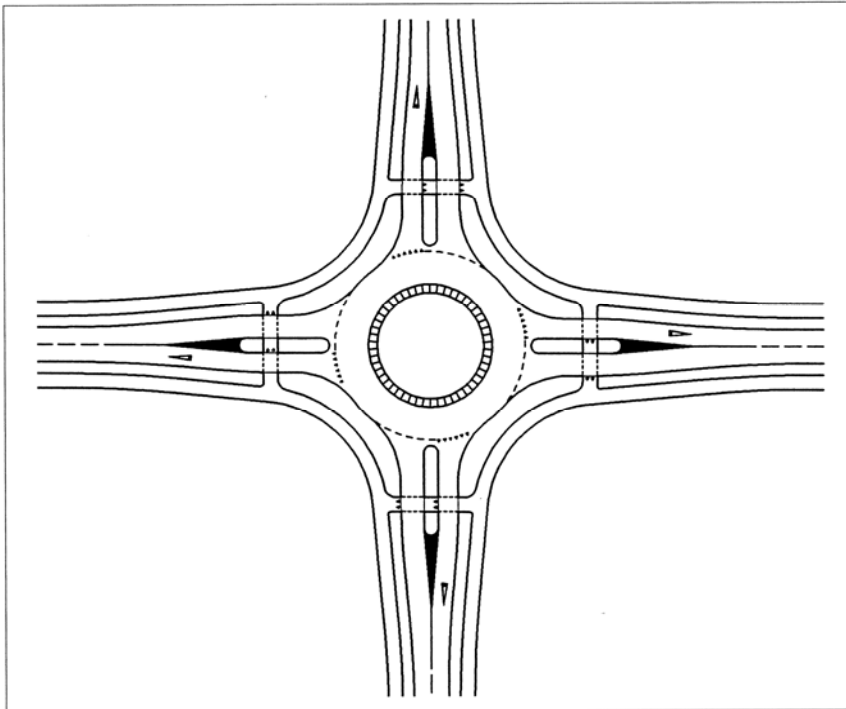
3.10.2 *Keuze van het type fietspad*

De Nederlandse richtlijnen maken een onderscheid naargelang de rotonde binnen dan wel buiten de bebouwde kom ligt. Vrijliggende fietsvoorzieningen genieten de voorkeur. Buiten de bebouwde kom worden fietsers best uit de voorrang gehouden. Dit betekent dat de fietser voorrang dient te verlenen bij het kruisen van de toeleidende wegvakken. Binnen de bebouwde kom krijgt de fietser voorrang (zie Figuur 6) (CROW, 2002).

Het verschil in voorrangsregeling wordt ook infrastructureel verduidelijkt (CROW, 1998; Lauwers, 1997):

- Bij fietsers in de voorrang:
 - o Het fietspad loopt volledig rond en evenwijdig met de rijbaan van de rotonde.
 - o Streepmarkering (Vlaanderen) / blokmarkering (Nederland) en haaiantanden op de rijbaan.
 - o Fietsoversteek in rood.
- Bij fietsers uit de voorrang:
 - o Het fietspad wordt zodanig aangelegd dat haakse oversteken ontstaan.
 - o Geen blokmarkering (CROW, 1998). Wel blokmarkering (Lauwers, 1997).
 - o Wegverharding van de rijweg doorzetten op plaats van fietsoversteek.
 - o Haaiantanden op het fietspad vòòr de oversteek.

Figuur 6. Rotonde met vrijliggend fietspad uit de voorrang.



Bron: CROW (1998).

3.10.3 Aanvullende ontwerpprincipes

Daarnaast gelden enkele algemene principes om rotondes voldoende veilig te maken voor fietsers (CROW, 2002):

- Bermen vlak uitvoeren en laag beplanten zodat fietser maximaal in gezichtsveld automobilist blijft.
- Regelmatig onderhoud markeringen omdat weggebruikers zich in hoge mate op de haaiantandmarkeringen baseren bij hun inschatting over de voorrangssituatie.
- Ondersteunen van de voorrangssituatie door de vormgeving. Een fietspad uit de voorrang moet vóór het kruispunt zodanig worden uitgebogen dat de fietser moet afremmen en bijgevolg niet geneigd is om aan een relatief hoge snelheid een oversteekmaneuver uit te voeren.

Fietsverkeer op vrijliggende fietspaden naast rotondes is meestal slechts toegelaten in één richting, maar ook fietsers in twee richtingen kunnen worden toegelaten (CROW, 1998). Vermits een dergelijk fietspad niet voldoet aan de verwachtingen van de weggebruiker zijn extra maatregelen nodig om het verwachtingspatroon van de automobilist bij te stellen: rode kleur fietspad, aslijnmarkering in midden van het fietspad, aangepaste verticale signalisatie, verhoogd uitvoeren van het fietspad.

In het Vlaamse Vademecum rotondes (Debaere & Vandeputte, 1997) wordt het type van fietsvoorziening (gemengd, aanliggend, vrijliggend) afhankelijk gesteld van de ruimtelijke situering van de rotonde (verkeersgebied, overgangsgebied, verblijfsgebied) en van de dimensie van de rotonde (groot, compact, mini). Dit leidt tot negen theoretisch mogelijke situaties waaraan telkens een wenselijk type afwikkeling van fietsers wordt toegekend (Tabel 1).

Tabel 1. De plaats van fietsers op rotondes (Vademecum Rotondes)

	Minirotondes	Compacte rotondes	Grote rotondes
Verblijfsgebieden	Gemengd verkeer	Gemengd verkeer	--
Overgangsgebieden	Gemengd verkeer	Gemengd verkeer of vrijliggend fietspad uit de voorrang	--
Verkeersgebieden	--	Vrijliggend fietspad uit de voorrang	Vrijliggend fietspad uit de voorrang of apart fietsnetwerk bij middel van tunnels

Bron: Debaere & Vandeputte (1997)

In het recentere Vademecum fietsvoorzieningen (MVG, 2001) wordt deze tabel op enkele punten aangepast. Grote rotondes kunnen nu ook in overgangsgebieden. Bij compacte en grote rotondes in overgangsgebieden wordt ook de mogelijkheid gegeven om fietsers in de voorrang te houden op een vrijliggend fietspad. Bij compacte rotondes in overgangsgebieden worden verhoogd aanliggende fietspaden (met voorrang voor de fietser) als bijkomende optie genoemd (Tabel 2).

Tabel 2. De plaats van fietsers op rotondes (Vademecum Fietsvoorzieningen)

	Minirotondes	Compacte rotondes	Grote rotondes
Verblijfsgebieden	Gemengd verkeer	Gemengd verkeer	--
Overgangsgebieden	Gemengd verkeer	Gemengd verkeer of verhoogd aanliggend fietspad in de voorrang of vrijliggend fietspad (al dan niet in de voorrang)	Vrijliggend fietspad in de voorrang of vrijliggend fietspad uit de voorrang of apart fietsnetwerk bij middel van tunnels
Verkeersgebieden		Vrijliggend fietspad uit de voorrang	Vrijliggend fietspad uit de voorrang of apart fietsnetwerk bij middel van tunnels

Bron: MVG (2001)

In Wallonië (MET, 2000) wordt een specifieke voorziening aangewezen geacht indien deze past in een fietspadennetwerk in de ruimere omgeving van de rotonde. Zelfs in een dergelijk geval stelt men dat er rekening mee dient gehouden te worden dat een aanzienlijk deel van de fietsers het fietspad zal verlaten om over de rijweg voor het gemotoriseerde verkeer over de rotonde te rijden. Toch stelt men ook hier dat bij belangrijke fietsintensiteiten (vanaf ongeveer 800 fietsers per uur) en indien er geen ruimtegebrek is, een ten opzichte van de rijweg gescheiden fietspad aangewezen is.

In Groot-Brittannië wordt er vanuit gegaan dat rotondes hoe dan ook gevaarlijk zijn voor fietsers (Brown, 1995; GHBA, 1993). Fietsers worden dan ook best niet over de rotonde geleid. Mogelijke alternatieven zijn het aanleggen van gescheiden fiets- en voetpaden op enige afstand van de rotonde, het signaleren van een alternatieve route, of volledige rijwegascheiding voor zwakke weggebruikers, bijvoorbeeld via fietstunnels. Indien dit niet mogelijk blijkt, moeten uitwaaiende toeritten worden vermeden of kan de rotonde

bijkomend worden uitgerust met verkeerslichten waardoor de fietsers beschermd kunnen oversteken.

De richtlijnen uit de Verenigde Staten (FHWA, 2000) stellen dat een fietser die een rotonde nadert de keuze zou moeten hebben om zich te mengen tussen het gemotoriseerde verkeer dan wel de rotonde als voetganger te kruisen. Dit principe is overigens ook terug te vinden in de Waalse richtlijnen (MET, 2000). Er wordt aangeraden om een eventueel aanwezig fietspad op een toerit van een rotonde op 30 meter voor de rotonde te laten uitmonden in de rijweg waardoor fietsers en motorvoertuigen vlak vóór en op de rotonde van dezelfde infrastructuur gebruik maken. Aan fietsers die niet wensen gemengd te worden met gemotoriseerd verkeer moet de kans geboden worden om via het – mogelijkwijze verbrede – voetpad of via een gemengd fiets- en voetpad over de rotonde te rijden.

Op stedelijke rotondes in Frankrijk (CETUR, 1999) wordt de aard van het fietspad afhankelijk gemaakt van de dimensie van de rotonde. Op minirotondes zijn geen fietsvoorzieningen nodig. Op rotondes met een buitenstraal van tussen de 12 en de 22 meter wordt aanbevolen het fietspad te laten stoppen op zowat 15 meter voor de rotonde en de fietser van dan af te mengen met het gemotoriseerd verkeer. Op rotondes met een buitenstraal van meer dan 22 meter wordt een aanliggend gemarkeerd fietspad aanbevolen. Vrijliggende fietspaden kunnen voorzien worden op rotondes met een buitenstraal van meer dan 20 meter of indien via de rotonde fietspaden aan beide zijden van het kruispunt moeten verbonden worden.

3.11 Voetgangervoorzieningen

Vaak worden er op rotondes geen specifieke oversteekvoorzieningen voor voetgangers aangebracht. Indien dit toch gebeurt, wordt meestal gebruik gemaakt van klassieke zebra's op de verschillende toe- en afritten.

Op rotondes zonder vrije doorgang voor fietsers en voetgangers (bv. via tunnels) is de oversteekbaarheid voornamelijk afhankelijk van de hiaten in de stroom oprijdende of afslaande voertuigen, evenals de snelheid van het afslaande verkeer en de aanwezigheid van een middengeleider. Voetgangers kunnen bij aanwezigheid van een middengeleider gefaseerd de toe- en afrit oversteken. De vormgeving van de rotonde zorgt voor een overzichtelijke situatie en de rij snelheden zijn laag, zodat oversteekhiaten goed kunnen worden ingeschat. In de regel is de wachttijd als verliestijd voor fietsers en voetgangers, ook zonder voorrang, korter dan bij een lichtengeregeld kruispunt. Indien voor de capaciteit van het bus- of autoverkeer vrije busbanen, bypasses of meerdere rijstroken worden toegepast, wordt de oversteekbaarheid evenwel aanzienlijk verslechterd. De oversteeklengte wordt immers vergroot, de snelheden worden hoger en de situatie wordt minder overzichtelijk (CROW, 1998).

De voetgangsoversteek dient op voldoende afstand van de rotonde zelf te worden voorzien (GBHA, 1993; Brown, 1995). In de Verenigde Staten is dit minimaal 7,5 m (één voertuiglengte) (FHWA, 2000), in Wallonië wordt 4 m aanbevolen (MET, 1999). In de Angelsaksische wereld wordt dit evenwel mee bepaald door de tangentiële vormgeving van de aansluiting van de toerit op de rotonde. Deze vormgeving heeft tot gevolg dat de rijwegbreedte op het einde van de toerit beduidend breder wordt en dat de snelheid van het passerende gemotoriseerde verkeer hoger is. Onbeschermd voetgangsoversteken over toeritten met meerdere rijstroken worden afgeraden. Eventueel kan een rustpunt in de middengeleider worden voorzien. Die moet dan wel voldoende breed zijn (ongeveer 1,8 m) zodat ook een voetganger met de fiets aan de hand zich veilig kan opstellen. Daarbij is het belangrijk dat de middengeleider ter hoogte van de doorsteek voor de voetgangers op het straatniveau ligt zodat ook rolstoelgebruikers en kinderwagens vlot kunnen oversteken (FHWA, 2000).

3.12 Voorzieningen voor zwaar vervoer en uitzonderlijk vervoer

Rotondes moeten in staat zijn om alle vrachtvoertuigen met standaardafmetingen te laten passeren binnen de rijbaanbreedte met de mogelijkheid van stuurcorrecties en met een aanvaardbare snelheid. Vele geometrische elementen van een rotonde zullen uiteindelijk gebaseerd zijn op de dimensies en de benodigde ruimte voor manoeuvres van het grootst mogelijke voertuig dat op de rotonde kan passeren. In de praktijk betekent dit dat de binnenstraal en de beschikbare rijbaanbreedte voldoende groot dienen te zijn. Deze geometrische vereisten kunnen enigszins tegenstrijdig zijn aan de veiligheidsdoelstellingen van een rotonde aangezien het aanbieden van voldoende manoeuvreerruimte aan vrachtwagens kan betekenen dat personenwagens met een hogere snelheid over de rotonde kunnen rijden. (CROW, 1998; FHWA, 2000).

Een bijzondere voertuigcategorie is het uitzonderlijk Vervoer. Uitzonderlijk vervoer kan in een aantal gevallen over de rotonde zelf geleid worden, wanneer de dimensies voldoende ruim zijn. Er wordt evenwel benadrukt dat dit niet ten koste van de noodzakelijke snelheidsreductie en bijgevolg de veiligheid mag gaan (CROW, 1998; Lauwers, 1997). In andere gevallen worden doorsteken in het middeneiland aangelegd of kan een bypass worden aangelegd die wordt afgesloten met afsluitbare hekken of slagbomen. Een andere mogelijkheid bestaat erin om een bijkomende overrijdbare strook aan te leggen aan de buitenzijde van de rotonde (MET, 1999).

Aangezien bepaalde vrachtwagencategorieën worden geconstrueerd met een bodemvrijheid van slechts 0,12m in onbeladen toestand, wordt aanbevolen om het hoogteverschil tussen de overrijdbare strook en de rijweg maximaal op 0,08m uit te voeren (CROW, 1998).

Omwille van de wisselende zichtvelden in de rechterzijspiegel van vracht- en busverkeer tijdens het rondraaien op de rotonde en de blinde hoeken tijdens het verlaten van de rotonde dient kritisch te worden omgegaan met fietsvoorzieningen. Er wordt aanbevolen om bij hoge percentages vracht- en busverkeer het fiets- en voetgangersverkeer ongelijkgronds af te wikkelen (CROW, 1998).

3.13 Openbaar vervoer

Lijnbussen kunnen als een bijzondere vorm van zwaar vervoer beschouwd worden. Zoals aangehaald onder 3.12 moeten de rotondes zodanig worden aangelegd dat bussen er met een aanvaardbare snelheid kunnen overrijden. Indien gebruik gemaakt wordt van een overrijdbare strook, kan dit leiden tot comfortverlies voor de busreiziger.

In sommige gevallen worden specifieke bus- of tramstroken aangebracht die het openbaar vervoer een comparatief voordeel opleveren op de rotonde. Zo kan een busstrook parallel aan en rechts van de toerit worden aangelegd. Een dergelijke busstrook kan ofwel doorlopen tot op de rotonde, ofwel vlak voor de rotonde uitkomen op de toerit. Een andere mogelijkheid is een bus- en/of trambaan in het midden van de weg te leggen, waarbij het openbaar vervoer dan via een voorbehouden strook recht door over de rotonde kan rijden. In dat geval dient de rotonde bijkomend te worden uitgerust met verkeerslichten om het naderende openbaar vervoer voorrang te verlenen ten opzicht van het kruisende verkeer (CROW, 1998).

3.14 Dimensie

De meest toegepaste vorm is de enkelstrooksrotonde waarbij zowel op de rotonde zelf als op de toe- en afritten slechts één rijstrook beschikbaar is (CROW, 1998). Wanneer de capaciteit van een enkelstrooksrotonde onvoldoende groot is, worden dubbelstrooks- of zelfs meerstrooksrotondes aangelegd.

Vanreusel (1997) onderscheidt drie types van rotondes naargelang hun dimensie: minirotondes, compacte rotondes en grote rotondes. Met een minirotonde wordt een rotonde bedoeld met een buitendiameter van 18m tot 25m. Bij een compacte rotonde is de buitendiameter tussen de 25m en de 40m, bij een grote rotonde tussen de 35m en de 50m.

In de Verenigde Staten worden rotondes eveneens opgedeeld in een aantal functionele categorieën (FHWA, 2000):

- o mini: buitendiameter 13-25m
- o stedelijk compact: buitendiameter 25-30m
- o stedelijk enkelstrook: buitendiameter 30-40m
- o stedelijk dubbelstrook: buitendiameter 45-55m
- o landelijk enkelstrook: buitendiameter 35-40m
- o landelijk dubbelstrook: buitendiameter 55-60m

In Groot-Brittannië, Wallonië en Frankrijk worden geen specifieke functionele categorieën onderscheiden, behalve de minirotonde (MET, 1999; GBHA, 1993; CERTU, 1999).

De dimensie van de rotonde kan ook uitgedrukt worden in functie van de diameter van het middeneiland. Zo vinden we de volgende definitie voor een minirotonde terug bij GBHA (1993) en Poté & Verbruggen (2002): een rotonde rond een vlakke of licht verhoogde cirkelvormige markering (soms niet meer dan een witte stip, in dat geval ook stiprotonde of punaiserotonde genoemd) van minder dan 4 meter diameter.

Nergens worden maximale waarden voor de afmetingen van rotondes gehanteerd.

3.15 Bijzondere vormen

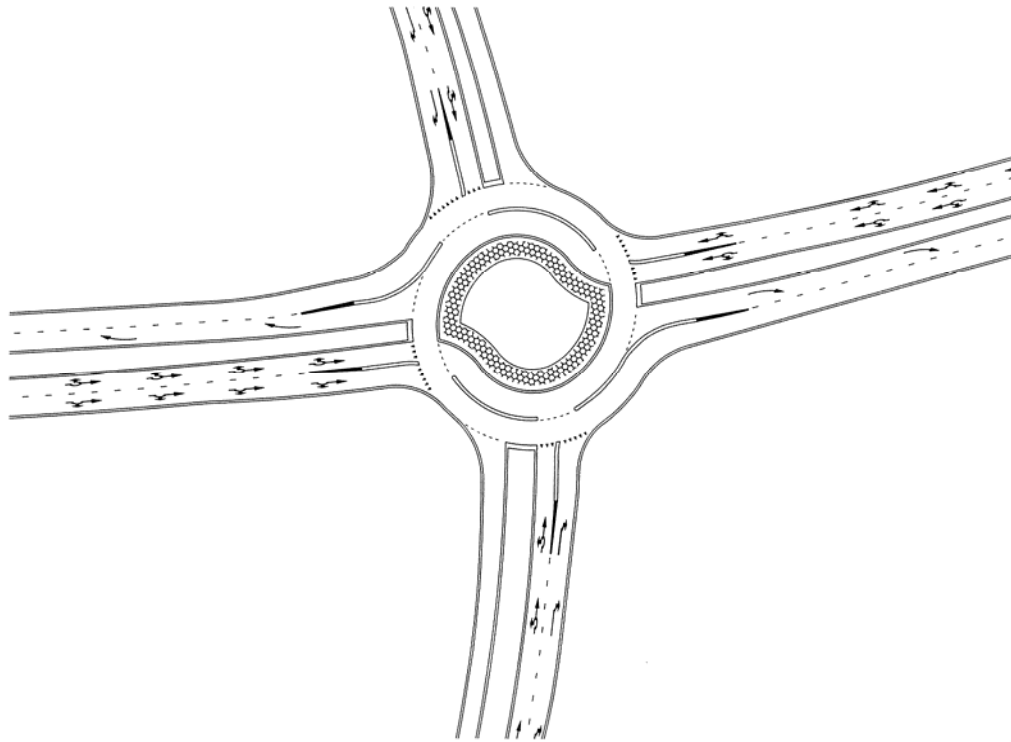
Behalve de klassieke rotondes bestaan er ook enkele bijzondere vormen, vaak met een specifiek toepassingsgebied. De redenen voor het gebruik van bijzondere vormen worden gevonden in het verhogen van de capaciteit van de rotonde (vb. turborotonde), of het oplossen van een bepaalde typische verkeerssituatie (vb. dubbele rotonde bij op- en afritten van autosnelwegen of een ovonde op een kruispunt met meer dan 4 takken).

3.15.1 *Turborotonde*

Een turborotonde, ook wel spiraalrotonde genoemd is een dubbelstrooksrotonde waarbij de rijweg een spiralend effect heeft. Op de rotonde worden de rijstroken fysiek van mekaar afgescheiden. Het middeneiland is niet meer cirkelvormig, maar aan twee zijden een beetje uitgerokken zodat in feite een eivormige rotonde ontstaat (0). Op sommige segmenten van de dubbelstrooksrotonde wordt het aantal rijstroken van twee naar één gereduceerd. Hierdoor wordt het verkeer gekanaliseerd en het aantal weefbewegingen verminderd, hetgeen minder conflictpunten en een betere doorstroming in de hand moet

werken. Voordeel van deze vorm is dat verkeer in één (dominante) richting door de constructie prioriteit krijgt waardoor de capaciteit van de rotonde verhoogt (CROW, 2002).

Figuur 7. Turborotonde.



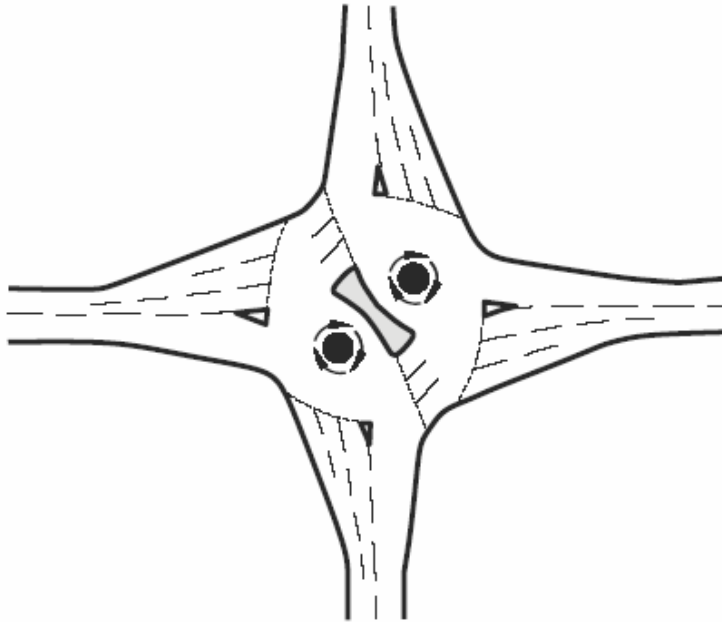
Bron: CROW (2002)

3.15.2 Dubbele rotonde

Een dubbele rotonde (ook wel brilrotonde genoemd) is een concept van kruispuntinrichting waarbij twee rotondes via een kort verbindingsstuk aan elkaar gekoppeld worden. Dit principe wordt bijvoorbeeld toegepast aan beide zijden van een autosnelweg om de verkeersafwikkeling van de op- en afritten naar de aansluitende weg (en omgekeerd) vlot te laten verlopen (Poté & Verbruggen, 2002; CERTU, 2000; CROW, 1998).

In Groot-Brittannië wordt de benaming dubbele rotonde ook gebruikt voor een rotonde die bestaat uit 2 middeneilanden die als één geheel functioneren (Figuur 8). Dit principe wordt toegepast bij geschrante kruispunten of ter vervanging van normale rotondes waarop capaciteitsproblemen ontstaan omwille van veel rondgaand verkeer ter hoogte van specifieke takken (GBHA, 1993).

Figuur 8. Britse dubbele rotonde.



Bron: GBHA, 1993

3.15.3 Kluifrotonde

Een kluifrotonde kan gedefinieerd worden als een dubbele rotonde waarbij het gedeelte dat nodig is voor de terugkeerbewegingen tussen de beide rotondes niet wordt aangelegd zodat een dubbele rotonde ontstaat die lijkt op een klui. Deze vorm lijkt ook wel op een bot of een halter, vandaar ook gevonden benamingen als bottonde of halterrotonde. In stedelijk gebied dient een kluifrotonde om verschillende, in de nabijheid van elkaar gelegen kruispunten, samen te brengen tot één kruispunt met een overzichtelijke en consequente structuur. Er worden dan twee rotondes aangelegd ter hoogte van de twee kruispunten, waarbij de terugdraaibeweging tussenin onmogelijk gemaakt wordt. De infrastructuur die ontstaat lijkt op een klui omdat tussen de rotondes een smalle strook wordt aangelegd. Dit is een ruimtebesparende maatregel die vooral in stedelijke omgeving dure en nutteloze onteigeningen kan vermijden (Poté & Verbruggen, 2002). Ook voor de aansluiting van op- en afrittencomplexen van autosnelwegen of autowegen op het onderliggende wegennet kan een kluifrotonde gebruikt worden. Het Nederlandse CROW (1998) oordeelt dat kluifrotondes niet aan te raden zijn.

3.15.4 Ovale rotonde

De elliptische of ovale rotonde (ook ovonde genoemd) is een rotonde met een ovaal middeneiland. Dit soort rotondes wordt toegepast op kruispunten met meer dan vier takken of kruispunten waar de tegenoverliggende takken niet in elkaars verlengde liggen. Een ovonde kan aangelegd worden als tussen de twee (denkbeeldige) halve rotondes een rechtstand ontstaat van ten minste 25 m (CROW, 1998). Voor kleinere rotondes wordt deze oplossing afgeraden.

3.15.5 Minirotonde

Minirotondes worden aangelegd op plaatsen met een beperkte ruimte, waarbij de wegbeheerder zowel een verbeterde verkeersafwikkeling als een verhoogde

verkeersveiligheid voor ogen kan hebben. Nadeel is dat minirotondes moeilijk te berijden zijn voor vrachtwagens en andere grote voertuigen.

In de meeste landen worden minirotondes beschouwd als de kleinste vorm van rotondes, uitgaande van een classificatie volgens de binnen- of de buitendiameter van de rotonde (zie ook 3.14 op p.26). In de Vlaamse, Franse en Amerikaanse richtlijnen worden gelijkaardige definities gehanteerd voor minirotondes: rotondes met een buitendiameter van ten hoogste 24 à 25 meter (Debaere & Vandeputte, 1997; CERTU, 1999; FHWA, 2000). In het Verenigd Koninkrijk wordt een minirotonde gedefinieerd als een rotonde met een middeneiland van minder dan 4 meter diameter (GBHA, 1993). In Frankrijk, het Verenigd Koninkrijk en de Verenigde Staten wordt hieraan toegevoegd dat het middeneiland bij een minirotonde volledig overrijdbaar dient te zijn (CERTU, 1999; GBHA, 1993; FHWA, 2000). Zoniet kunnen grote voertuigen zoals vrachtwagens en bussen niet over de rotonde rijden. Het middeneiland kan zowel licht verhoogd (naar overrijdbaar) worden uitgevoerd als volledig vlak waarbij het enkel wordt gemarkeerd (GBHA, 1993). In Frankrijk wordt er voor gekozen om toch enig reliëf te voorzien (CERTU, 1999).

Ook in Vlaanderen bestaat belangstelling voor minirotondes. De wetgeving laat de benaming "rotonde" en het bijhorende verkeersbord D5 (zie p. 10) echter uitsluitend toe indien het middeiland "aangelegd" is en indien alle bestuurders (dus ook zware voertuigen) rond het middeneiland kunnen rijden (K.B. 1/12/1975; M.B. 11/10/1976; Donné, 2005). Donné (2005) pleit voor een aanpassing van de wetgeving zodat de aanleg van minirotondes juridisch geregeld wordt.

3.16 Verlichting

Het middeneiland van de rotonde bepaalt de herkenbaarheid van de rotonde, ook 's nachts. Wanneer het middeneiland onvoldoende waargenomen wordt, komt de aanwezigheid van een rotonde voor sommige weggebruikers over als een verrassing en ontstaan ongevallen (CERTU, 1999; FHWA, 2000; GBHA, 1993, MET, 1999). Bijgevolg is het noodzakelijk het middeneiland te verlichten of ervoor te zorgen dat elementen aanwezig zijn die oplichten in het schijnsel van de koplampen van het voertuig. Belangrijk bij de verlichting van de rotonde is dat de continuïteit van de verlichting van de naderingswegen verbroken worden. De rotonde zelf wordt best aan de buitenzijde verlicht om het middeneiland goed aan te stralen. De lichtpunten worden hoger opgesteld naarmate de rotonde groter is. Op het middeneiland zelf wordt best gebruik gemaakt van heldere materialen die het licht beter reflecteren. De rand van het middeneiland dient van een duidelijke markering voorzien te worden (Donné, 1997; CROW, 1998).

4. CONCLUSIES OVER DE GEOMETRISCHE KENMERKEN VAN ROTONDES

De basisprincipes voor de aanleg van rotondes in de verschillende landen zoals ze blijken uit de bestaande ontwerprichtlijnen blijken een sterke overeenstemming te vertonen. Zo wordt principieel steeds gekozen voor eerder radiale toeritten, cirkelvormige middeneilanden, en gescheiden fiets- en voetgangersvoorzieningen. De principiële aspecten die bijdragen tot de veiligheid, de verkeersafwikkeling en de operationele kosten van rotondes worden in de verschillende landen op een behoorlijk gelijkende wijze aanvaard en beoordeeld.

Toch blijken er ook verschillen te bestaan tussen de onderzochte ontwerprichtlijnen, vooral in verband met de aan te leggen fiets- en voetgangersvoorzieningen en de aansluitingen van de toe- en de afritten op de rotonde. In Groot-Brittannië en de Verenigde Staten lijkt de aandacht groter voor het handhaven van een homogene snelheid voor het verkeer dat de rotonde oprijdt ten opzichte van het verkeer dat reeds op de rotonde rijdt dan in de andere onderzochte landen en regio's. In Nederland en Vlaanderen lijkt de aandacht voor de fietser hoger te zijn dan elders, hetgeen vermoedelijk te maken heeft met het grotere aandeel fietsers in het verkeer. Verder valt op dat alle gehanteerde maten voor rijstrookbreedtes, bochtstralen, diameter enz. in Vlaanderen krap zijn in vergelijking met de gevonden waarden in het buitenland.

Vermits de bestudeerde richtlijnen in de meeste landen geen rigide voorschriften zijn, maar vooral aanbevelingen en codes van goede praktijk, is het niet duidelijk in welke mate sommige aanbevelingen binnen de betreffende landen ook coherent en systematisch worden toegepast. Bovendien laten de richtlijnen vaak een grote variatie aan afmetingen toe waardoor aan wegbeheerders intrinsiek de mogelijkheid wordt geboden voor een, al dan niet systematische, minimalistische of maximalistische interpretatie. De analyse van de geldende aanbevelingen in een bepaald land is bijgevolg ontoereikend om definitieve conclusies te trekken over de wijze van aanleg van rotondes in dat land. Om dit wel te kunnen doen zou een vergelijkend onderzoek op basis van terreindata nodig zijn.

5. AFWEGINGSFACTOREN BIJ DE KEUZE VOOR EEN ROTONDE

In de literatuur worden tal van criteria opgesomd die worden toegepast om uit te maken of rotondes al dan niet een geschikte oplossing vormen op bepaalde kruispunten. De criteria hebben zowel betrekking op veiligheidsaspecten als op capaciteitselementen, maar ook in sommige gevallen op stedenbouwkundige en verkeersplanologische overwegingen.

Ogden (1996) somt een aantal situaties op waarin rotondes toepasbaar zijn:

- Voorrangskruispunten waar de verkeersintensiteit tot onaanvaardbaar lange wachttijden zou leiden voor het verkeer op de ondergeschikte takken of waar verkeerslichten tot een verhoging van de wachttijd op alle takken zouden leiden.
- Kruispunten met veel linksafslaand verkeer.
- Kruispunten met meer dan 4 takken, waardoor een voorrangsregeling onmogelijk wordt en verkeerslichten weinig efficiënt zijn, omwille van het grotere aantal fasen dat benodigd is.
- Kruispunten tussen verzamelwegen of tussen verzamelwegen en lokale wegen, waar een verhoogd ongevalrisico bestaat.
- Op lokale wegen, als onderdeel van een strategie om de snelheid laag te houden.
- Op landelijke kruispunten.
- Op kruispunten waar de hoofdstroom van het verkeer een bocht van 90 graden maakt.
- Waar hoofdwegen overgaan in een Y- of T-vormig kruispunt.

Rotondes zijn volgens deze auteur minder geschikt in volgende situaties:

- Een aangepaste geometrie is onmogelijk omwille van gebrek aan ruimte of topografische beperkingen.
- Kruispunten met sterk ongelijke verkeersstromen uit de verschillende richtingen.
- Kruispunten tussen hoofdwegen en sterk ondergeschikte wegen waardoor een onaanvaardbare vertraging zou ontstaan voor het verkeer op de hoofdweg.
- Kruispunten met veel voetgangersbewegingen in combinatie met hoge voertuigintensiteiten of hoge snelheden.
- Op een geïsoleerd kruispunt in een netwerk van opeenvolgende kruispunten met verkeerslichten.
- Op kruispunten waar het verkeer dat de rotonde verlaat op korte afstand dient te stoppen voor een verkeerslicht waardoor het verkeer op de rotonde zelf zou stremmen.

Vanreusel (1997) onderscheidt criteria op macro- en microniveau die bepalen of een rotonde een zinvolle oplossing is.

Met macro-niveau wordt het verkeersplanologische niveau bedoeld. Het gaat om de functionele categorisering van het wegennet. Rotondes passen beter op lokale en secundaire wegen dan op hoofdwegen of primaire wegen. In het Ruimtelijk Structuurplan Vlaanderen wordt de aanleg van rotondes echter ook uitdrukkelijk voorzien op primaire wegen (RSV, 1998).

Daarnaast speelt de typologie van het kruispunt op zichzelf een rol waarbij de auteur vooral stedenbouwkundige elementen als determinerend beschouwt voor de vraag of een rotonde een aangewezen oplossing is. Ook de samenhang van opeenvolgende kruispunten in het systeem speelt een rol. De auteur stelt dat een logisch systeem van rotondes de ruimtelijke structuur versterkt, de verkeersveiligheid bevordert en een sturend effect heeft.

Criteria op micro-niveau die doen pleiten ten gunste van een rotonde zijn:

- Evenwicht van verkeer op verschillende takken: des te groter het evenwicht, des te meer een rotonde aangewezen is als oplossing.
- Een kruispunt met meer dan 4 takken.

Criteria op micro-niveau die een aanwijzing vormen tégen de aanleg van een rotonde zijn:

- Kruispunten met uitgesproken piekverkeer (toegang tot een bedrijventerrein, winkelcentrum,...).
- De aanwezigheid van een kruispunt met lichtenregeling in de onmiddellijke omgeving. Dit is problematisch omwille van de mogelijke stremming van het verkeer op de rotonde.
- Niet teveel rotondes op korte afstand van mekaar op wegen voor doorgaand verkeer.
- Meerdere toe- en afritten. De oversteekbaarheid voor fietsers wordt verminderd.
- Grote aantallen fietsers.
- Aanwezigheid van een tramlijn die rechtdoor moet rijden over het middeneiland. Dit kan enkel op een rotonde met lage verkeersintensiteiten.

In CROW (1998) wordt een beschrijving gegeven van situaties waarin een rotonde beter of minder geschikt is dan een kruispunt met verkeerslichten. Op het vlak van verkeersveiligheid worden rotondes gunstig beoordeeld omdat ze ook 's nachts en op dalmomenten de snelheid van het verkeer omlaag halen in tegenstelling tot de kruispunten met verkeerslichten waar roodlichtrijden 's nachts veelvuldig voorkomt.

Op het vlak van de verkeersafwikkeling scoort een rotonde ook goed, op voorwaarde dat het verkeer min of meer gelijkmatig gedoseerd is over de verschillende takken. Zoniet ontstaan wachtrijen op de drukste tak. Er wordt geen absolute maat opgegeven voor de capaciteitsverhouding tussen een rotonde en een kruispunt met verkeerslichten.

Prioritering voor het openbaar vervoer is gemakkelijker bij een lichtengeregeld kruispunt dan bij een rotonde. Een middel om openbaar vervoer prioriteit te verlenen bestaat erin om de bus via een busstrook langs de wachtrij te leiden en vlak voor de rotonde te laten invoegen. Een andere vorm is het aanleggen van een busstrook op de toerit die wordt doorgetrokken tot aan een dubbelstrooksrotonde.

Bij een klassiek lichtengeregeld kruispunt kunnen fietsers en voetgangers één tak per keer oversteken. Bij rotondes is dit voor fietsers afhankelijk van de voorraangsregeling. Indien de fietser geen voorrang heeft, is hij sterk afhankelijk van de verkeersdruk. Toch besluit CROW dat de wachttijd voor zowel fietsers als voetgangers, ook zonder voorrang, in de regel korter is op rotondes dan op lichtengeregelde kruispunten.

6. VERKEERSVEILIGHEIDSEFFECTEN VAN ROTONDES

Onder 5. werden afwegingsfactoren beschreven die gehanteerd worden om uit te maken of een rotonde in een bepaalde situatie een geschikte kruispuntvorm kan zijn. Daarbij blijken, behalve de verkeersveiligheid, ook de verkeersafwikkeling en de ruimtelijke inplanting een rol te spelen bij de afweging. In hetgeen volgt spitsen we ons toe op de veronderstelde effecten van rotondes op één van deze aspecten, namelijk de verkeersveiligheid. We behandelen eerst het bestaande theoretische kader over de verkeersveiligheid van rotondes en gaan vervolgens na welke wetenschappelijke evidentie bestaat over een aantal aspecten van deze verkeersveiligheid.

6.1 Theoretisch kader

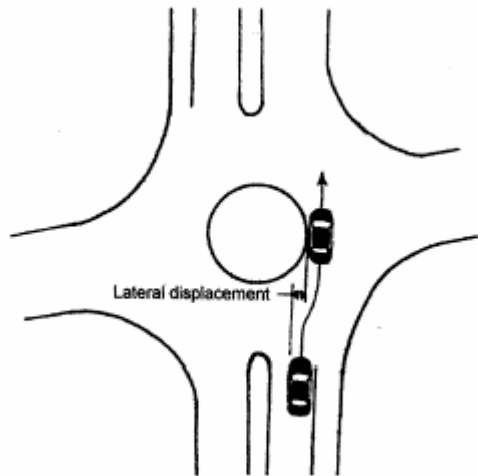
Rotondes kunnen om drie redenen veiliger zijn dan andere kruispuntvormen (FHWA, 2000):

- Ze wijzigen of elimineren potentiële conflictpunten tussen voertuigen. Vooral de potentieel gevaarlijke conflicten zoals botsingen van twee voertuigen onder een rechte hoek of frontale aanrijdingen bij linksafslaande bewegingen verdwijnen.
- De snelheid van de verschillende weggebruikers op de rotonde zelf is homogeen. Dat betekent dat de relatieve snelheden (snelheden van de verschillende weggebruikers ten opzichte van elkaar) laag zijn, ook ten opzichte van fietsers. Bij een klassiek kruispunt is dit helemaal niet het geval.
- Het verkeer dat de rotonde nadert of erop rijdt wordt fysiek gedwongen om te vertragen. De absolute snelheid is dus laag waardoor weggebruikers meer tijd hebben om de verkeerssituatie te overzien en te anticiperen op mogelijke conflicten.

Elvik & Vaa (2004) sommen vijf algemene redenen op waarom rotondes de verkeersveiligheid bevorderen:

- Rotondes reduceren het aantal conflictpunten tussen verkeersstromen.
- Weggebruikers die de rotonde naderen moeten voorrang verlenen aan de weggebruikers op de rotonde. Op die manier wordt voorzichtigheid bij het naderen van de rotonde afgedwongen.
- Alle verkeer op het kruispunt komt uit één richting. Weggebruikers hoeven slechts naar het verkeer uit één richting te kijken en te wachten op een hiaat om de rotonde op te rijden.
- Rotondes elimineren links afslaande bewegingen.
- Rotondes zijn zodanig gemaakt dat weggebruikers geen rechtlijnig traject over het kruispunt kunnen volgen. De laterale verplaatsing (zie Figuur 9) reduceert de snelheid.

Figuur 9. Laterale verplaatsing op een rotonde.



Bron: Hydén & Várhelyi (2000)

Voor de bepaling van de ontwerpsnelheid op rotondes kan gebruik gemaakt worden van de volgende formule (FHWA, 2000):

$$V = \sqrt{127 \cdot R \cdot (e + f)}$$

waarbij

V = ontwerpsnelheid

R = straal, m

e = dwarshelling, m/m

f = zijdelingse wrijvingsfactor

De wrijvingsfactor f geeft de wrijving tussen de banden van het voertuig en het wegoppervlak weer en varieert naargelang de snelheid van het voertuig.

De formule drukt uit dat drie variabelen determinerend zijn voor de maximaal gereden snelheid op een rotonde: de boogstraal (R) van de feitelijk gevolgde rijcurve, de dwarshelling van de rijweg (e) en de zijdelingse wrijvingsfactor (f).

6.1.1 Conflicten

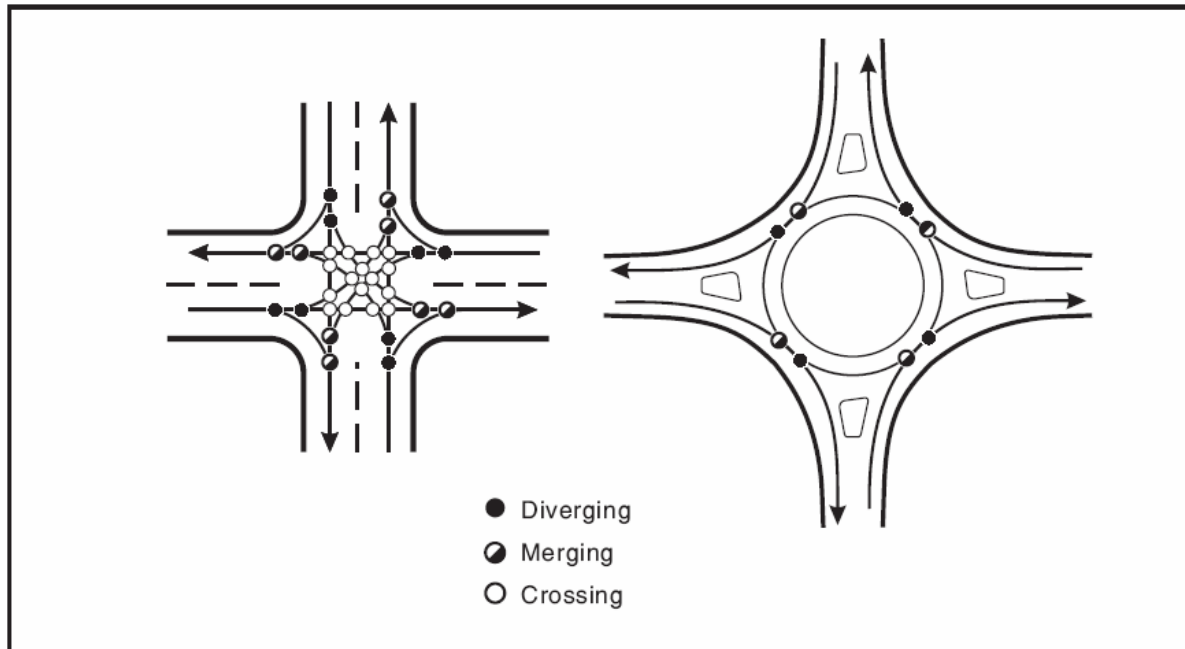
De frequentie van aanrijdingen op een kruispunt is afhankelijk van het aantal conflictpunten op het kruispunt, en van de omvang van de conflicterende verkeersstromen. Als een conflictpunt wordt elk punt beschouwd waarop de trajecten van weggebruikers (gemotoriseerde voertuigen, maar ook voetgangers of fietsers) vlak achter mekaar lopen, zich samenvoegen, kruisen of zich verspreiden. Niet elk conflict leidt tot een aanrijding, maar het aantal aanrijdingen houdt wel verband met het aantal conflicten (FHWA, 2000).

Op een (enkelstrooks)rotonde worden kruisingen van verkeersdeelnemers als potentiële conflicten vermeden. Het aantal punten waar verkeersdeelnemers samenkomen of van waaruit ze zich verspreiden wordt gehalveerd. Globaal wordt het aantal conflictpunten door een rotonde gereduceerd van 32 naar 8, een vermindering van 75%. 0 geeft dit grafisch weer.

Behalve conflicten met andere weggebruikers zijn ook andere conflicten mogelijk. Zo vormt het middeneiland van een rotonde een bijzonder gevaar dat mogelijk resulteert in

een verhoogd aandeel van éézijdige ongevallen, vooral op dalmomenten. Op een klassiek kruispunt eindigen een groot aantal overtredingen op momenten met weinig verkeer immers niet in een aanrijding (FHWA, 2000).

Figuur 10. Voertuigconflicten op enkelstrooksrotondes.



Bron: FHWA (2000)

Er kan ook een onderscheid gemaakt worden tussen legale en illegale conflicten. Legale conflicten zijn conflicten die toch nog kunnen optreden wanneer alle weggebruikers zich houden aan de verkeersregels. Voorbeelden zijn het achter mekaar rijden op een rotonde of het invoegen in een verkeersstroom. Illegale conflicten zijn conflicten die veroorzaakt worden door het negeren van verkeersborden –of verkeersregels door één of meerdere weggebruikers. Voorbeelden zijn het niet verlenen van voorrang aan voetgangers of het niet halt houden aan een stopteken.

Vier dimensies spelen een rol in een conflictanalyse: het bestaan van een conflictpunt, de verkeersintensiteit ('expositie'), de ernst van het conflict (die afhankelijk is van de relatieve snelheden van de conflicterende verkeersstromen) en de kwetsbaarheid van de weggebruiker (die bepaald wordt als de kans dat de betrokken weggebruiker een aanrijding overleeft).

Conflicten kunnen worden verdeeld in 3 basiscategorieën met variërende ernst (FHWA, 2000):

- Wachtrijconflicten: dit zijn conflicten die optreden wanneer een voertuig één of meerdere wachtende voertuigen nadert, bijvoorbeeld op de toerit van een rotonde. Deze conflicten zijn typisch de minst ernstige omdat de relatieve snelheidsverschillen tussen de voertuigen relatief gering zijn en eventuele aanrijdingen gebeuren op de delen van de voertuigen die de beste bescherming bieden.
- Samenvoeg- en divergentieconflicten: deze conflicten worden veroorzaakt door het samenvoegen of het splitsen van verkeersstromen. De meest voorkomende aanrijdingen ten gevolge van het samenvoegen zijn kop-staartbotsingen en zijdelingse (schamp)aanrijdingen. Samenvoegconflicten kunnen ernstiger zijn dan divergentieconflicten omwille van de grotere waarschijnlijkheid van een impact op de

zijkant van het voertuig, die typisch minder beschermd is dan de voor- of de achterzijde.

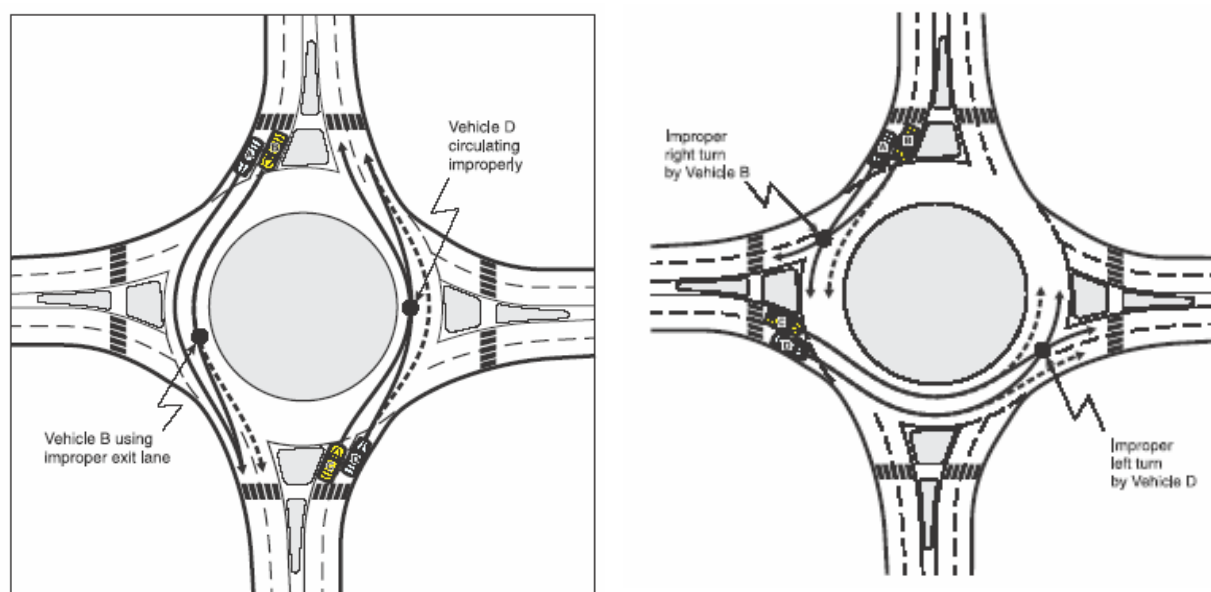
- Kruiselingse conflicten: deze conflicten worden veroorzaakt door de kruising van 2 verkeersstromen. Dit zijn de ernstigste van alle conflicten en degene die de grootste kans genereren op ongevallen met doden of gewonden. Typische aanrijdingen zijn zijdelingse aanrijdingen onder rechte hoek en frontale aanrijdingen.

6.1.2 Dubbelstrooksrotondes

Dubbelstrooksrotondes hebben op het gebied van veiligheid een aantal eigenschappen die gemeenschappelijk zijn met of gelijkaardig zijn aan die van enkelstrooksrotondes. Toch bevatten ze ook een aantal extra conflictpunten die worden veroorzaakt door de dubbele toerit en/of afrit (beide niet noodzakelijk aanwezig) en de dubbele rijstrook op de rotonde (zie Figuur 11). De extra conflictpunten hebben te maken met het veranderen van rijstrook en het kruisen van rondgaand verkeer met afslaand of invoegend verkeer. Toch worden de conflicten minder ernstig bevonden dan bij alternatieve kruispunten omwille van de lage snelheid waaraan ze optreden (FHWA, 2000).

(FHWA, 2000) rapporteert eveneens een aanzienlijke toename van het aantal conflicten indien méér dan één rijstrook aanwezig is op de toeritten, ongeacht of de rotonde zelf één of twee rijstroken telt.

Figuur 11. Specifieke voertuigconflicten op dubbelstrooksrotondes.



Bron: FHWA (2000)

6.1.3 Fietsers en voetgangers

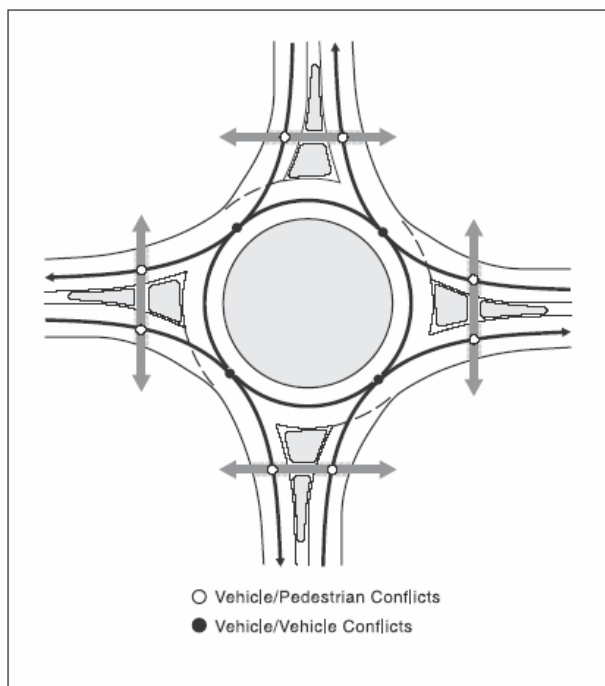
Fietsers en voetgangers kunnen op rotondes terecht komen in specifieke conflictsituaties. In vergelijking met verkeerslichtengeregelde kruispunten hebben rotondes als nadeel dat de conflicten tussen gemotoriseerde voertuigen en zwakke weggebruikers niet kunnen geregeld worden door een groen- en roodfasering.

a. Voetgangers

Rotondes leveren voor voetgangers een vergelijkbaar aantal conflictmogelijkheden op dan klassieke voorrangsgeregelde of ongeregelde kruispunten (zie Figuur 12). Rotondes sluiten sommige conflicten tussen gemotoriseerde voertuigen en voetgangers uit die bestaan bij verkeerslichtengeregelde kruispunten (FHWA, 2000):

- Zijdelingse aanrijdingen ten gevolge van roodlichtnegatie.
- Conflict tussen rechtsafslaand verkeer en overstekende voetganger bij groen licht.
- Conflict tussen linksafslaand verkeer en overstekende voetganger bij groen licht.

Figuur 12. Voertuig/voetgangersconflicten op een enkelstrooksrotonde.



Bron: FHWA, 2000.

b. Fietsers

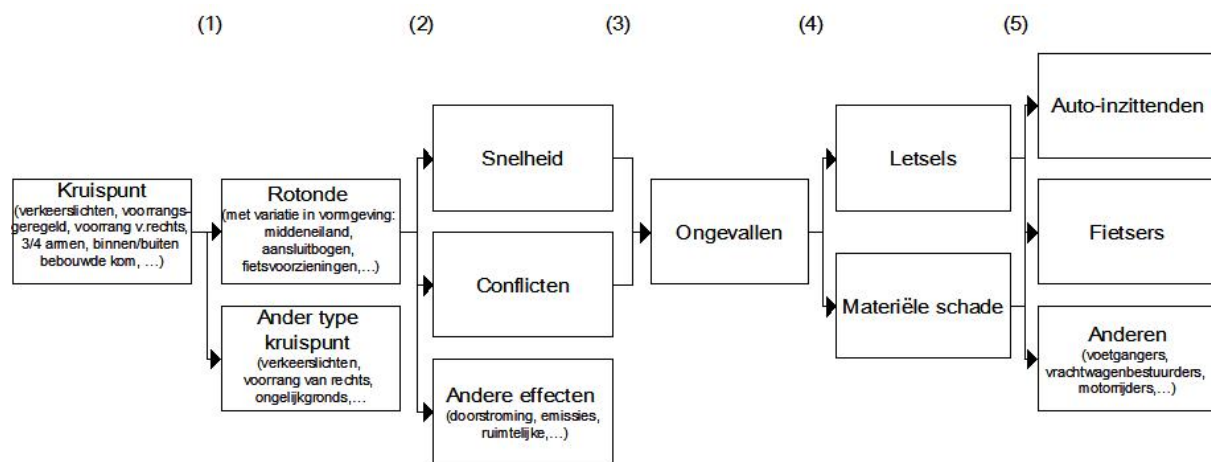
De conflicten voor fietsers hangen af van de vormgeving van de rotonde. Indien er geen specifieke fietsvoorzieningen aanwezig zijn (gemengd verkeer) of indien het fietspad aanliggend is hebben fietsers in principe dezelfde conflictpunten als het gemotoriseerde verkeer. Niettemin kan het aantal conflicten groter zijn omwille van de geringere zichtbaarheid en het grotere snelheidsverschil (Brown, 1995; FHWA, 2000).

6.2 Classificatie van effecten

De bovenstaande verkeersveiligheidseffecten van rotondes kunnen we ook op een meer schematische manier beschrijven zoals wordt voorgesteld in Figuur 13. De eerste stap (1) geeft de omvorming van een bestaand kruispunt tot een rotonde of een andere mogelijke kruispuntvorm weer. Niet alle rotondes zijn hetzelfde. Naargelang de vormgeving van het middeneiland, het aantal rijstroken, de rijstrookbreedte, het type

van fietsvoorzieningen enz. kunnen de veiligheidseffecten verschillend zijn. De tweede stap (2) geeft weer dat de aanleg van een rotonde gevolgen heeft op de snelheid en op conflicten tussen verkeersstromen. Naast deze effecten kunnen er ook gevolgen zijn voor ondermeer de verkeersdoorstroming, emissies en de ruimtelijke beleving. Wijzigingen in snelheid en conflicten tussen verkeersdeelnemers hebben een gevolg op het aantal en de aard van optredende ongevallen (3). Niet elk ongeval kent een even erge afloop, hetgeen wordt uitgedrukt in stap 4 waarin een onderscheid wordt gemaakt tussen ongevallen naargelang de letelernst. Meestal worden ongevallen opgesplitst in ongevallen met uitsluitend materiële schade en ongevallen met lichamelijk letsel (indeling "licht gewond" – "zwaar gewond" – "dood"). Stap 5 tenslotte geeft weer dat de gevolgen van de optredende ongevallen mogelijk verschillend zijn voor verschillende types weggebruikers.

Figuur 13. Rotondes en effect op verkeersveiligheid – schematische weergave



6.3 Voor- en na-onderzoek

Afhankelijk van de onderzoeksvraag kunnen verschillende onderzoeksmethodes gehanteerd worden. Een vaak gebruikte onderzoeksmethode als het gaat over effecten op verkeersonveiligheid is het voor- en na-onderzoek op basis van het vastgestelde aantal ongevallen.

In zijn meest eenvoudige benadering komt deze methode erop neer dat het aantal ongevallen met een bepaalde letselernst (bijvoorbeeld het aantal ongevallen met minstens een lichtgewonde) vóór en na uitvoering van een maatregel (zoals het aanleggen van een rotonde) wordt vergeleken. Deze werkwijze schiet echter op meerdere punten tekort en wordt daarom ook wel een 'naïeve voor- en nastudie' genoemd (Hauer, 1997).

Vooreerst is er het stochastische karakter van ongevallen. Zelfs indien er geen enkele maatregel wordt genomen op een locatie en de aard, hoeveelheid en het gedrag van het voorbijrijdende verkeer dezelfde blijven, zal zich een natuurlijke fluctuatie voordoen in het aantal ongevallen op deze locatie. Deze fluctuatie is louter gebaseerd op toeval. Om een analyse van de onveiligheid van een bepaalde locatie te kunnen uitvoeren mag men zich bijgevolg niet uitsluitend baseren op de gemeten onveiligheid in een bepaalde periode (vb. het aantal letselongevallen in een bepaald jaar), maar moet een verwachte waarde bepaald worden van de ongevallenfrequentie (aantal ongevallen met een bepaalde afloop gedurende een tijdsperiode) op de locatie.

Daarnaast doen zich een aantal algemene trends voor die invloed hebben op de onveiligheid: toename of afname van het verkeer, wijzigend gedrag bij weggebruikers, wijzigende samenstelling van het verkeer, weersomstandigheden, wetswijzigingen. Deze algemene trends zorgen ervoor dat de onveiligheid op een locatie groter of kleiner wordt, ook zonder dat een specifieke maatregel wordt genomen. Om het effect van een bepaalde maatregel te kennen, moet bijgevolg onderscheid gemaakt worden tussen het effect van de maatregel zelf en het trendeffect dat ook op de locatie een rol speelt. Dit onderscheid is nodig om te vermijden dat een eventueel gevonden effect volledig, maar onterecht, zou toegeschreven worden aan de maatregel.

Een derde fenomeen heeft te maken met het selectieve karakter van de locaties waarop maatregelen worden genomen. Zo worden (infrastructurele) maatregelen vaak toegepast op locaties met een opmerkelijk hoog historisch aantal ongevallen. Rekening houdend met het bovengenoemd stochastisch karakter van ongevallen, kan echter verwacht worden dat het aantal ongevallen op locaties die geselecteerd werden omwille van een hoog aantal ongevallen in een bepaald jaar, het jaar nadien zal afnemen, ook zonder het nemen van een specifieke maatregel. Dit effect wordt in de literatuur "regressie naar het gemiddelde" genoemd. Het is duidelijk dat in een dergelijk geval een eventuele daling van het aantal ongevallen niet of niet volledig kan toegeschreven worden aan de genomen maatregel, maar louter met toevalselementen te maken heeft en waarschijnlijk ook zou hebben plaatsgevonden als er geen maatregel was genomen.

Om een voor- en nastudie op basis van waarnemingen toch correct te kunnen uitvoeren moet met de bovengenoemde aspecten rekening gehouden worden. Methodes om, rekeninghoudend met de statistische eigenschappen van ongevallenfrequenties op locaties, te corrigeren voor de invloed van trendeffecten en regressie naar het gemiddelde, worden beschreven in Hauer (1997), Elvik (2002) en Nuyts & Cuyvers (2003). Voorbeelden van voor- en nastudies die rekening houden met de effecten van trends en regressie naar het gemiddelde worden gevonden in Persaud et al. (2001) en De Brabander et al. (2005).

Voor- en nastudies die geen rekening houden met de effecten van trend en regressie naar het gemiddelde komen in de praktijk vaak voor. Hauer (1997) spreekt in dit verband over de naïeve voor- en nastudie. Hierdoor kunnen resultaten systematisch over- of onderschat worden. In de praktijk worden de effecten van maatregelen hierdoor vaak overschat omdat maatregelen in principe meestal worden uitgevoerd op locaties waar een verhoogd risico is vastgesteld (dat mogelijk, maar ook niet noodzakelijk aan toeval toe te schrijven is) en omdat het aantal ongevallen, vooral met zwaardere afloop, het jongste decennium globaal is afgenomen (Elvik, 2002).

6.4 Onderzoekresultaten

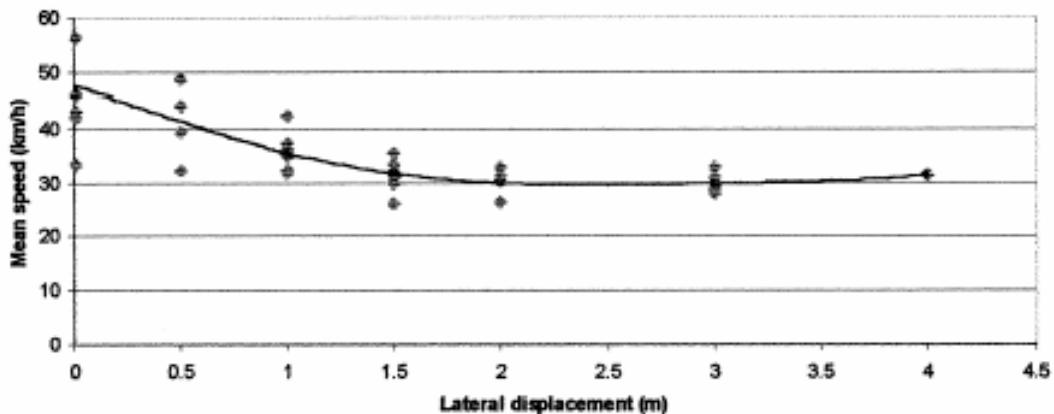
Onderstaand worden de gevonden onderzoekresultaten over de veiligheidseffecten van rotondes besproken. Ten behoeve van de duidelijkheid worden deze resultaten gerangschikt volgens de ordening in het schema zoals weergegeven in Figuur 13 op pagina 38.

6.4.1 *Effecten op snelheid*

De theoretisch veronderstelde effecten op de rijsnelheden zijn bevestigd door onderzoek. De gemiddelde rijsnelheid voor auto's op rotondes nam significant af in vergelijking met de periode voordat de rotonde werd aangelegd. De afname van de snelheid is groter naargelang ze dichter bij de rotonde wordt gemeten (Hydén & Várhelyi, 2000; van Minnen, 1994). De snelheid van het verkeer op de rotonde wordt sterk beïnvloed door de laterale verplaatsing die voertuigen op de rotonde moeten afleggen (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). De laterale verplaatsing wordt bepaald door de

diameter van het middeneiland en door de aansluitboog van de toeritten. Reeds vanaf een laterale verplaatsing van 2 meter wordt al een grote snelheidsreductie gemeten (Hydén & Várhelyi, 2000). De daling van de snelheid werd gemeten tot op ongeveer 300 meter van de rotonde.

Figuur 14. Verband tussen laterale verplaatsing en de gemiddelde snelheid bij het oprijden van de rotonde.



Bron: Hydén & Várhelyi (2000)

6.4.2 Effecten op conflicten

Het aantal conflicten tussen voertuigen op rotondes lijkt eerder toe te nemen dan af te nemen in vergelijking met de periode vòòr de aanleg (van Minnen, 1994). Niettemin vond deze auteur dat de conflicten minder zwaar waren dan voorheen. Het aandeel conflicten met fietsers en bromfietzers wijzigde nauwelijks. Rotondes met vrijliggende fietspaden vertoonden minder conflicten tussen fietsers en naderend autoverkeer dan rotondes met fietsstroken.

In de Zweedse stad Växjö werden in het kader van een proefproject 21 kruispunten omgevormd tot minirotondes of kleine rotondes (diameter van het middeneiland variërend van 4 tot 18 meter). Hydén en Várhelyi (2000) onderzochten de verkeersveiligheidseffecten van deze ingreep. Daarbij maakten ze gebruik van conflictobservaties op 12 kruispunten. Opvallend resultaat was dat het aantal conflicten tussen auto's min of meer gelijk bleef. Het aantal conflicten tussen fietsers en auto's enerzijds en tussen voetgangers en auto's anderzijds nam sterk af.

Gegeven de theoretische veronderstelling dat rotondes het aantal conflictpunten tussen weggebruikers doen verminderen (bijvoorbeeld van 32 naar 8 voor rotondes met vier takken – zie eerder in dit rapport), zijn de bovenstaande resultaten enigszins verrassend. Hoewel de onderzoeken van Hydén en Várhelyi (2000) en van Minnen (1994) mekaar enigszins tegenspreken, stellen ze geen van beiden een vermindering van het aantal conflicten vast. Op zijn minst betekent dit dat het aantal conflicten niet recht evenredig is met het aantal conflictpunten. Indien beide veronderstellingen juist zijn (aantal conflictpunten vermindert op een klassiek vier-armig kruispunt van 32 naar 8 en het aantal conflicten vòòr en na aanleg van de rotonde verandert niet wezenlijk) betekent dit dat het aantal conflicten per conflictpunt op een rotonde verviervoudigt in vergelijking met de voorsituatie.

van Minnen (1994) observeerde het voorrangsgedrag van weggebruikers op rotondes. Het voorrang verlenen door het naderende verkeer aan het verkeer op de rotonde

verloopt correct, zolang de naderende verkeersstroom niet te dominant is. Indien dit wel het geval is, daalt het percentage juist voorrang verlenen merkbaar. Het voorrang verlenen door automobilisten aan fietsverkeer op de rotonde levert weinig problemen. Daarentegen vond deze auteur dat het voorrang verlenen door autobestuurders aan fietsers die op een vrijliggend fietspad in de voorrang rijden, problematisch is. Het omgekeerde (door fietser voorrang verlenen aan afslaannde auto bij het oversteken) verloopt veel beter.

Observaties van het voorrangsgedrag in een Zweeds onderzoek (Hydén en Várhelyi, 2000) leerden dat vooral zwakke gebruikers vaker voorrang kregen na de aanleg van de rotonde dan tevoren. Er bleek echter ook dat meer dan 40% van de fietsers die de rotonde opreden geen voorrang verleenden aan aankomende wagens.

van Minnen (1994) mat eveneens het gebruik van de richtingaanwijzer op rotondes. De auteur concludeerde dat het gebruik van de richtingsaanwijzers zodanig willekeurig en zo weinig consistent is dat andere weggebruikers daar weinig houvast aan hebben.

6.4.3 *Effecten op letselongevallen*

Maycock en Hall (1984) (geciteerd in Brown, 1995) verzamelden uitgebreide data over 84 rotondes in Groot-Brittannië. Enkele van de voornaamste bevindingen waren:

- o de gemiddelde ongevallenfrequentie op de onderzochte rotondes was 3,31 letselongevallen per jaar. Bij 16 % van de ongevallen was er een zwaargewonde of een dode.
- o Gemiddeld waren er 27,5 ongevallen per miljoen passerende voertuigen (=ongevallenratio).
- o Op kleinere rotondes in 30-40 mijl/u-zones (48 tot 64 km/u) was de ongevallenfrequentie en de ongevallenratio groter dan op grotere rotondes.

Schoon en van Minnen (1993) onderzochten ongevallengegevens in de periode 1984-1991 op 201 rotondelocaties in Nederland. Ze vergeleken het aantal letselongevallen en het aantal slachtoffers vóór en na aanleg van de rotondes. Daarbij werd gecorrigeerd voor het effect van de algemene trend in de verkeersonveiligheid door het gevonden cijfer te delen door de trend voor alle kruispunten in Nederland in de beschouwde periode. Aangezien niet elke rotonde in hetzelfde jaar werd aangelegd werd een 'gemiddeld' overgangsjaar berekend. Met het mogelijk regressie-naar-het-gemiddelde-effect werd in dit onderzoek geen rekening gehouden.

Naast ongevallengegevens werden ook intensiteitsgegevens verzameld of bijkomend geregistreerd, zodat intensiteiten voor gemotoriseerd verkeer en fietsers ter beschikking waren voor 70% van de onderzochte kruispunten. Omdat er geen rekening gehouden werd met mogelijke regressie naar het gemiddelde, is het mogelijk dat de resultaten van dit onderzoek het werkelijke effect overschatten (Persaud et al., 2001). Naast algemene reductiefactoren voor het aantal ongevallen en de letselernst werden in dit onderzoek ook reductiefactoren opgesplitst per leeftijdscategorie, type aanrijding, type verkeersdeelnemers, alcoholgebruik, lichtgesteldheid, ligging binnen of buiten bebouwde kom, voorsituatie op het kruispunt, type fietsvoorzieningen en verkeersdrukke van het kruispunt.

Enkele conclusies uit dit onderzoek:

- De aanleg van een rotonde op een bestaand kruispunt leidt tot een gemiddelde reductie van 47% van het aantal letselongevallen en van 71% van het aantal slachtoffers.
- De reductiepercentages van slachtoffers voor de diverse categorieën verkeersdeelnemers variëren sterk: auto-inzittenden 95%, voetgangers 89%, bromfietsers 63%, fietsers 30% (cijfers zonder correctie voor trend)

- De reductie van het aantal slachtoffers buiten de bebouwde kom (86%) is groter dan binnen de bebouwde kom (69%) (cijfers zonder correctie voor trend).
- De wijziging van een voorrangskruispunt (oude situatie) in een rotonde gaf een sterkere reductie van het aantal slachtoffers te zien dan de wijziging van een kruispunt met verkeerslichten of een kruispunt zonder voorrangregeling.
- Het verschil in type fietsvoorziening is, gemeten naar het aantal ongevallen per jaar, niet groot. Indien wordt gekeken naar het aantal slachtoffers per jaar zijn rotondes met een vrijliggend fietspad (reductie 90%) veiliger dan rotondes met een fietsstrook (reductie 25%) of rotondes zonder fietspad (reductie 41%) (cijfer zonder correctie voor trend, kleine aantallen ongevallen in de subgroepen).

Persaud et al. (2001) onderzochten ongevallen op 23 rotondes in de Verenigde Staten. De gebruikte onderzoeksmethode was een voor- en nastudie waarbij correctie werd toegepast voor regressie naar het gemiddelde en voor wijzigingen in de verkeersintensiteit na de omvorming van het kruispunt tot een rotonde. De correctie voor regressie naar het gemiddelde werd uitgevoerd door de gemeten waarden voor de onveiligheid te vergelijken met geschatte waarden voor de onderzochte locaties op basis van de 'Empirical Bayes'-methode (Hauer, 1997). Voor de schatting van de verwachte waarde van het aantal ongevallen op de onderzochte locaties in het geval er geen rotonde zou zijn aangelegd, werd, behalve van de gekende ongevalldata op de onderzochte locaties in de periode voorafgaand aan de herinrichting, gebruik gemaakt van twee verschillende regressiemodellen met data over vergelijkbare kruispunten uit eerdere onderzoeken.

Het onderzoek leverde een statistisch significante reductie van 40% (effectiviteitsindex 0,60 met een standaardafwijking van 0,04) van het totaal aantal ongevallen en van 80% (effectiviteitsindex 0,20 met een standaardafwijking van 0,06) van het aantal ongevallen met lichamelijk letsel.

De gevonden effectiviteitscijfers verschillen naargelang het type voorsituatie op het kruispunt zoals blijkt uit Tabel 3.

Tabel 3. Veiligheidseffect van omvorming kruispunt tot rotonde.

Type voorsituatie	aantal kruispunten	effectiviteitsindex		Reductiepercentage	
		Alle ongevallen (standaardafwijking)	Ong. lichamelijk letsel (standaardafwijking)	Alle ongevallen	Ong. lichamelijk letsel
1 rijstrook, stedelijk, regeling met stoptekens	8	0,28 (0,06)	0,12 (0,08)	72	88
1 rijstrook, ruraal, regeling met stoptekens	5	0,42 (0,07)	0,18 (0,09)	58	82
Meerdere rijstroken, stedelijk, regeling met stoptekens	6	0,95 (0,10)	-	5	-
Stedelijk, lichtengeregeld	4	0,65 (0,09)	0,26 (0,14)	35	74
Alle kruispunten	23	0,60 (0,04)	0,20 (0,06)	40	80

Bron: Persaud et al., 2001

De Waalse wegeadministratie maakte een analyse van kruispunten die werden omgevormd tot rotondes (MET, 2003). De analyse werd uitgevoerd op basis van ongevallendata uit de periode 1992-2000 van 122 kruispunten die in deze periode werden omgevormd tot een rotonde. Het gemiddeld jaarlijks aantal ongevallen met gekwetsten op het kruispunt vòòr aanleg van de rotonde werd vergeleken met het gemiddeld jaarlijks aantal ongevallen met gekwetsten in de periode na de aanleg van de rotonde. Na aanleg van een rotonde bleek het gemiddeld jaarlijks aantal ongevallen met gewonden met 42% gedaald te zijn. Het aantal ongevallen met zwaargewonden daalde met 48%. In stedelijk gebied bleek de daling van het aantal letselongevallen (15%, 32 rotondes) lager te zijn dan in overgangsgebied (46%, 45 rotondes) of buitengebied (50%, 45 rotondes).

Het onderzoek paste geen correctie toe voor effecten van trend of regressie naar het gemiddelde. De auteurs vermelden enkel dat in de betreffende periode (1992-2000) het globaal aantal letselongevallen (overal in België, dus niet alleen op rotondes) verminderde met 15%.

In hetzelfde onderzoek werd de ongevallenfrequentie op rotondes (aantal letselongevallen gedeeld door het aantal passerende motorvoertuigen) vergeleken met de ongevallenfrequentie op lichtengeregelde kruispunten. De ongevallenfrequentie bleek steeds hoger te zijn voor lichtengeregelde kruispunten dan voor rotondes, zowel voor ongevallen met zwaargewonden of doden als voor ongevallen met uitsluitend lichtgewonden. Het verschil was beduidend groter in buitengebied dan in stedelijk gebied.

Uit een eerder uitgevoerd onderzoek in Frankrijk (CETUR, 1992) bleek een gelijkaardige tendens: de gemiddelde ongevallenfrequentie per kruispunt bleek beduidend hoger voor lichtengeregelde kruispunten (beste schatting 0,641 ongevallen met een 90% betrouwbaarheidsinterval [0,605; 0,680]) dan voor rotondes (beste schatting 0,329 met 90% betrouwbaarheidsinterval [0,268; 0,407]). Voor beide vermelde onderzoeken geldt evenwel dat, behalve het al dan niet aanwezig zijn van een rotonde of een verkeerslichtenregeling, andere – niet onderzochte – verschillen in factoren bestaan tussen de beide groepen kruispunten (rotondes en lichtengeregelde) die op hun beurt een verklaring zouden kunnen vormen voor het gemeten verschil in onveiligheid. Enkele van deze factoren zijn het gemiddelde en de spreiding van de verkeersintensiteit, verschillen in de ruimtelijke omgeving, wegvaktypologie,...

CETUR (1992) onderzocht tevens een staal van 202 ongevallen op 179 rotondes in stedelijke omgeving op de meest voorkomende ongevallentypes. 3 ongevallentypes bleken dominant voor te komen:

- Geen voorrang verlenen bij het oprijden van de rotonde.
- Controleverlies bij het oprijden van de rotonde.
- Aanrijding tegen het middeneiland.

Elvik (2003) maakte een meta-analyse van 28 onderzoeken uit 8 landen buiten de Verenigde Staten die allen het veiligheidseffect van rotondes inschatten. Daarbij waren zowel onderzoeken volgens het principe van de voor- en nastudie (al dan niet met correctie voor trendeffecten en regressie naar het gemiddelde) als comparatieve onderzoeken waarbij rotondes vergeleken worden met andere kruispunten (bv. lichtengeregelde). Opvallend is dat slechts 4 van de 23 onderzochte voor- en nastudies zowel voor trend als voor regressie naar het gemiddelde corrigeerden.

De analyse gebeurde aan de hand van een klassieke meta-analyse en een meta-regressie. Beide methodes worden gebruikt om de resultaten van individuele onderzoeken op een statistisch verantwoorde manier te aggregeren. De auteur corrigeerde de resultaten voor het mogelijke probleem van 'publication bias' (het gegeven dat onderzoeksresultaten die slechts minimaal afwijken van eerdere onderzoeken of die indruisen tegen algemeen gangbare opvattingen minder gemakkelijk worden gepubliceerd).

Deze auteur kwam tot de volgende conclusies met betrekking tot het effect op letselongevallen:

- Rotondes reduceren het aantal ongevallen met gekwetsten met 30 tot 50%
- Rotondes reduceren de ernst van letselongevallen. Het aantal dodelijke ongevallen neemt af met 50 tot 70%, afhankelijk van de vroeger bestaande kruispuntregeling en van het aantal takken.
- Slechts een beperkt aantal onderzoeken hebben de effecten op de verkeersveiligheid van ontwerpkenmerken van rotondes bestudeerd. De gevonden resultaten zijn niet steeds eenduidig, maar in de meerderheid van de onderzoeken wordt vastgesteld dat rotondes met een kleiner middeneiland veiliger zijn dan rotondes met een groter middeneiland.

De Brabander et al. (2005) onderzochten het veiligheidseffect van 95 rotondes die op Vlaamse gewestwegen werden aangelegd in de periode 1994-1999. De gebruikte methodiek corrigeerde voor de effecten van trend en regressie naar het gemiddelde. De auteurs kwamen tot de conclusie dat het globaal aantal letselongevallen na de aanleg van de rotonde met 34% [B.I. 15%; 59%] verminderde. Voor het aantal ongevallen met minstens een zwaargewonde was de vermindering (beste schatting 38% met 95% betrouwbaarheidsinterval [27%; 72%]) groter dan voor het aantal ongevallen met minstens een lichtgewonde (30%; B.I. [14%; 45%]).

Flannery (2001) onderzocht ongevallenfrequenties en -types op acht enkelstrooksrotondes vóór en na de aanleg van de rotonde. Hij kwam tot de conclusie dat na de aanleg van de rotonde controleverlies over het stuur in 45% van de gevallen de directe oorzaak was van het ongeval. Dit controleverlies werd in drie op de vijf gevallen veroorzaakt door een te hoge naderingssnelheid van de voertuigen.

Brüde & Larsson (2000) vonden op basis van een cross-sectionele studie een kwadratisch verband tussen de gereden snelheid en het aantal gekwetsten op rotondes.

6.4.4 *Effecten op ongevallen met uitsluitend materiële schade*

In een methodologisch correct uitgevoerde vóór- en nastudie van ongevallen op 23 rotondes in de Verenigde Staten (Persaud et al, 2001) werd een significante reductie gevonden van alle ongevallen na de aanleg van een rotonde, ook van ongevallen met uitsluitend stoffelijke schade (zie ook Tabel 3 op p. 42).

Elvik (2003) kwam niettemin op basis van een meta-analyse tot de conclusie dat het effect van rotondes op het aantal ongevallen met stoffelijke schade hoogst onzeker is en sterk varieert van onderzoek tot onderzoek. Bij drie-armige kruispunten wordt geregeld zelfs een verhoging van het aantal ongevallen met stoffelijke schade waargenomen.

6.4.5 *Invloed op onveiligheid voor fietsers*

Het Franse CETUR (1992) analyseerde de typologie van 202 ongevallen op 179 rotondes. Bij 85 van deze ongevallen (42%) was minstens één lichte tweewieler betrokken (fiets of bromfiets). De twee meest voorkomende types waren ongevallen waarbij geen voorrang werd verleend aan de tweewieler (51%) en aanrijding tegen het middeneiland (19%, enkel bij bromfietsers).

Maycock en Hall (1984) (geciteerd in Brown, 1995) vonden op basis van een analyse van ongevallen op 84 rotondes in Groot-Brittannië dat de betrokkenheid van fietsers bij ongevallen op rotondes (uitgedrukt in aantal ongevallen per 100 miljoen passages) 10 tot 15 keer hoger was dan voor auto-inzittenden. Er waren fietsers betrokken in 13 tot 16% van de ongevallen op de onderzochte rotondes, terwijl fietsers in de regel minder dan 2% van de verkeersstroom uitmaken. De auteurs waarschuwen bovendien voor een mogelijke selectieve onderrapportering van ongevallen met fietsers. 68% van de

fietsongevallen op de 84 onderzochte rotondes hadden te maken met fietsers die op de rotonde reden. In de meerderheid van deze ongevallen ging het om aanrijdingen tussen fietsers die reeds op de rotonde reden en wagens die de rotonde wilden oprijden. Voor zover bekend had dit onderzoek betrekking op rotondes zonder specifieke fietsersvoorzieningen.

Uit hetzelfde onderzoek bleek dat de ongevalbetrokkenheid van fietsers op dubbelstrooksrotondes twee tot drie keer groter is dan op verkeerslichtengeregelde kruispunten van 2 X 2-strooks wegen. Voor de auto's bleek het tegenovergestelde op te gaan.

Schoon en Van Minnen (1993) onderzochten de slachtofferreductie bij fietsers op 181 rotondelocaties in Nederland. Het aantal fietsslachtoffers op rotondes bleek met 30% te zijn afgenomen ten opzichte van de periode vóór aanleg van de rotonde. Het aantal slachtoffers in personenwagens bleek evenwel met 95% te zijn afgenomen. Ook voor andere verplaatsingswijzen bleek het effect groter dan voor de fietsers: bromfiets (63%), voetgangers (89%), overige vervoermiddelen (64%). Er werd in dit onderzoek geen rekening gehouden met mogelijk optredende algemene trendeffecten waardoor – uitgaande van een algemeen dalende trend van de verkeersonveiligheid – de reductiepercentages mogelijk overschat zijn (zie ook de beschrijving onder 6.3 op p. 38).

Schoon en Van Minnen (1993) onderzochten ook het aantal fietsongevallen in functie van het type fietsvoorziening op de rotonde: geen aparte fietsvoorziening, een fietsstrook op de rotonde en een afzonderlijk fietspad. Ze kwamen tot de bevinding dat de verschillen tussen deze typen klein zijn wat betreft het aantal ongevallen per jaar. Wel waren er verschillen met betrekking tot het aantal slachtoffers per jaar: bij een intensiteit van meer dan 8.000 motorvoertuigen per dag en bij een fietsintensiteit 'van enige betekenis' leiden rotondes met een vrijliggend fietspad tot een kleiner aantal fiets- en bromfietsongevallen ten opzichte van beide andere typen fietsvoorzieningen.

Van Minnen (1994) verrichtte een voor- en na-onderzoek op 6 rotondelocaties. Het onderzoek bestond voor een deel uit conflictobservaties waaruit bleek dat het aantal conflicten met fietsers en bromfietsers na aanleg niet afnam op de rotondes. Wel werd een verschuiving naar de minder ernstige conflicten vastgesteld.

Van Minnen en Braimaster (1994) onderzochten de voorrangsregeling voor fietsers op vrijliggende fietspaden rond rotondes. In een eerste deel van dit onderzoek werden waarnemingen gedaan over het feitelijke voorrangsgedrag en rijgedrag op rotondes. Van de 6 onderzochte rotondelocaties waar fietsverkeer in twee richtingen op de oversteken niet was toegelaten, werd dit in 2 tot 13% van de gevallen toch vastgesteld. De gemiddelde verliestijd voor fietsers op oversteken waar zij geen voorrang hadden, bleek ongeveer 6 seconden te bedragen op rotondes met een intensiteit tot 700 auto's per uur op de betreffende tak. Op deze rotondes bleek ongeveer 35% van de fietsers te stoppen. Op rotondes waar fietsers formeel voorrang hadden bleek toch in gemiddeld 20% van de situaties de auto voorrang te krijgen. Waar auto's formeel voorrang hadden bleek in 33% van de gevallen de fietser toch voorrang te krijgen. Dit effect speelde beduidend sterker bij toerijgend (46% van de gevallen) dan bij afrijdend autoverkeer (14% van de gevallen).

In het tweede deel van hetzelfde onderzoek werd een ongevallenstudie gedaan van 9 rotondes met vrijliggende fietspaden en fietsers in de voorrang. De gevonden ongevallencijfers werden vergeleken met de in Schoon en Van Minnen (1993) gevonden risicocijfers voor fietsers op rotondes: +/- 0,16 slachtoffers per miljoen passages op vrijliggende fietspaden met fietsers in de voorrang tegenover 0,04 slachtoffers per miljoen passages op vrijliggende fietspaden uit de voorrang. Dit gegeven bracht de onderzoekers tot de conclusie dat fietsers in de voorrang een aanzienlijk hoger risico lopen.

Van Minnen (1995) onderzocht de evolutie doorheen de tijd van het aantal ongevallen en het aantal slachtoffers op 23 aangelegde rotondes zonder fietsvoorziening, 111 rotondes

met een fietsstrook en 62 rotondes met een volwaardig fietspad. De auteur trok enkel kwalitatieve conclusies en concludeert dat de resultaten in de lijn liggen van het onderzoek van Schoon en Van Minnen (1993). Het onderzoek baseerde zich uitsluitend op gegevens ná aanleg van de rotonde.

In een vervolgrapport bespreekt Van Minnen (1998) de veiligheidseffecten van de voorrangregeling voor fietsers op rotondes. Ook hier is de beschrijving veeleer kwalitatief.

Brüde en Larsson (1996) voerden een cross-sectionele studie uit op een bestand van rotondes uit Zweden, Denemarken en Nederland waarbij het aantal fietsongevallen op rotondes vergeleken werd met het verwachte aantal fietsongevallen op kruispunten. Ze maakten gebruik van een eerder ontwikkeld voorspellend model voor fiets- en voetgangersongevallen op kruispunten. De resultaten suggereren dat enkelstrooksrotondes en kleine rotondes veiliger zijn voor fietsers. Met name bleek het aantal fietsongevallen op kleine enkelstrooksrotondes ongeveer gelijk was aan het verwachte aantal ongevallen. Voor grotere en meerstrooksrotondes bleek dit aantal 6 maal hoger te zijn. De auteurs geven evenwel zelf aan dat het onderzoek beperkt was in opzet, ondermeer omdat gewerkt werd met een beperkte en onvolledige dataset.

Räsänen en Summala (2000) onderzochten het gedrag van gemotoriseerde weggebruikers op toeritten van rotondes op het moment dat een rond de rotonde rijdende fietser nadert. Ze creëerden gecontroleerde conflictsituaties door een testfietser de rijweg te laten kruisen op verschillende manieren en observeerden het gedrag van de autobestuurders. Het gedrag werd geobserveerd aan de hand van naderingssnelheid, hoofdbewegingen en de wijze waarop voorrang werd verleend aan de testfietser. Het onderzoek werd uitgevoerd op 6 rotondes in Finland, Zweden en Denemarken. De naderingssnelheid van de personenwagens op rotondes met een groot middeneiland (40 m diameter) bleek lager te zijn dan op rotondes met een kleiner middeneiland (13-16 m diameter). De meerderheid van de bestuurders merkte de fietser correct op, zelfs indien de fietser (onverwacht) van rechts kwam (tegengestelde richting van het gemotoriseerd verkeer, in sommige landen wettelijk toegelaten). Daartegenover staat dat 7 tot 15% van de bestuurders de fietser die van rechts kwam helemaal niet opmerkte. Bestuurders die sneller reden bleken de fietser ook minder op te merken, hetgeen de auteurs deed besluiten dat een hogere snelheid bestuurders ertoe brengt slechts selectievere aandacht te besteden aan de verkeerssituatie. Een groter aantal bestuurders verleende voorrang aan de fietser bij een aanliggend fietspad dan bij een vrijliggend fietspad op ongeveer 6 meter van de rotonde.

Brüde en Larsson (2000) analyseerden de onveiligheid voor fietsers op 72 rotondes in Zweden. Het betrof allen rotondes met minstens 100 fietsers per dag. De onderzoekers maakten gebruik van een cross-sectioneel rekenmodel met als verklarende variabelen het aantal motorrijtuigen en het aantal fietsers. Daarbij werd vergeleken met voorspelde waarden van het aantal ongevallen en ernstgraad voor klassieke kruispunten, zowel lichtengeregelde als ongeregelde. Op basis van een regressie-analyse trokken de onderzoekers de volgende conclusies:

- Rotondes met een lagere verkeersintensiteit (<10.000 motorvoertuigen per dag, <1.000 fietsers per dag) zijn veiliger voor fietsers dan rotondes met een hogere intensiteit.
- Rotondes met een middeneiland van meer dan 10 meter zijn veiliger voor fietsers dan rotondes met een kleiner middeneiland.

In Nederland is vooral de discussie over het al dan niet 'in' of 'uit' de voorrang houden van fietsers op rotondes met vrijliggend fietspad levendig gebleven. In een recent onderzoek becijferde Dijkstra (2004) wat er zou gebeurd zijn indien de voorrangregeling op alle rotondes met vrijliggend fietspad binnen de bebouwde kom in Nederland gelijk zou zijn geweest: fietsers of allemaal 'in' of allemaal 'uit' de voorrang.

De berekeningen gebeurden als volgt: uit eerdere onderzoeken werden kencijfers gehaald voor het aantal ziekenhuisgewonden per jaar per rotonde, zowel voor de variant 'uit de voorrang' als de variant 'in de voorrang'. Van het totale aantal slachtoffers per rotonde werden verder enkel de aanrijdingen tussen motorvoertuigen en fietsers beschouwd. Het gevonden getal werd vermenigvuldigd met het totale aantal rotondes binnen de bebouwde kom waarlangs een vrijliggend fietspad is aangelegd. Bij een eerste scenario, met alle fietsers 'uit' de voorrang, zou het aantal ziekenhuisgewonden (slachtoffers die minstens 24u in een ziekenhuis worden opgenomen ten gevolge van een verkeersongeval) ten opzichte van een gewoon kruispunt zijn afgenomen met minimaal 59 en maximaal 84 ziekenhuisgewonden per jaar (-87%). Bij een tweede scenario, algemene toepassing van fietsers 'in' de voorrang, zou de besparing ten opzichte van een gewoon kruispunt slechts 7 tot 11 ziekenhuisgewonden (-11%) hebben bedragen. Het verschil tussen de algemene toepassing van één van beide voorrangstellingen ligt tussen de 52 en 73 ziekenhuisgewonden per jaar. Dit komt neer op tussen de 1,8% en de 2,5% van het jaarlijkse totale aantal ziekenhuisgewonden onder fietsers en bromfietzers in botsing met motorvoertuigen in Nederland.

Op basis van deze bevindingen concludeerde de auteur dat rotondes binnen de bebouwde kom met toepassing van het regime fietsers 'uit' de voorrang veiliger zijn dan rotondes met fietsers 'in' de voorrang.

6.4.6 Invloed op onveiligheid voor voetgangers

Behalve fietsongevallen (cfr. supra) onderzochten Brüde en Larsson (2000) ook ongevallen met voetgangers op 72 rotondes. Een beperking van het onderzoek waren het geringe aantal observaties: 'slechts' 15 ongevallen in de observatieperiode waarvan 12 met gewonden. De onderzoekers vonden voldoende sterke aanwijzingen om te besluiten dat enkelstrooksrotondes voor voetgangers veel veiliger zijn dan dubbelstrooksrotondes.

CETUR (1992) rapporteert dat bij 21 van de 202 (10, 4%) onderzochte ongevallen op rotondes in stedelijke omgeving in het westen van Frankrijk minstens één voetganger betrokken was. Dit is een vergelijkbare proportie met alle stedelijke kruispunten (10, 9%) in Frankrijk in dezelfde periode. Een vergelijking tussen ongevallen waarbij voetgangers betrokken waren op kruispunten met verkeerslichten (n= 1238) en rotondes (n= 179) in dezelfde steden leverde een gemiddelde ongevallenfrequentie op van voetgangersongevallen van 0,084 (verkeerslichten, betrouwbaarheidsinterval [0,072; 0,100]) en 0,061 (rotondes, betrouwbaarheidsinterval [0,035; 0,102]). De auteurs besluiten hieruit dat rotondes ook voor voetgangers beter scoren dan lichtengeregelde kruispunten. Nadeel is dat geen rekening werd gehouden met mogelijke verschillen in voetgangers- of verkeersintensiteiten tussen beide onderzochte groepen, hetgeen beide groepen moeilijk vergelijkbaar maakt (Evans, 2004; Elvik & Vaa, 2004).

Maycock en Hall (1984) (geciteerd in Brown, 1995) vonden in hun onderzoek geen specifieke verbanden tussen ongevallen met voetgangers en specifieke geometrische variabelen. Het aandeel ongevallen met voetgangers in het onderzochte staal van 84 rotondes bedroeg 4 tot 6%.

6.4.7 Effecten naargelang de voorsituatie op het kruispunt

Veruit de meeste rotondes worden aangelegd ter vervanging van bestaande kruispunten zoals kruispunten met verkeerslichten, kruispunten waarbij één rijrichting voorrang heeft of kruispunten waarbij de algemene voorrang-van-rechts-regel geldt. Een aantal elementen kunnen een rol spelen bij de beslissing om een rotonde aan te leggen: functie van het kruispunt en de aansluitende wegvakken in het wegennet, het aantal takken op het kruispunt, verkeersdrukte, samenstelling van het verkeer, inpassing in de ruimtelijke omgeving, aantal en aard van de geregistreerde ongevallen, kostprijs enz.

Schoon & van Minnen (1993) rapporteerden een grotere afname van het aantal letselongevallen op kruispunten die voordien voorrangsgeregeld waren dan op kruispunten die voordien lichtengeregeld waren. In zijn meta-analyse vond Elvik (2003) een gelijkaardig resultaat, maar bestempelde hij het effect als sterk onzeker.

Ook in de Verenigde Staten werd dit effect gevonden (Persaud et al, 2001 - zie Tabel 3 op pagina 42).

In Groot-Brittannië werd eerder al een afwijkend resultaat gevonden. Green (1977) (geciteerd in Brown, 1995) onderzocht de ongevallen op kruispunten die werden omgevormd tot een rotonde in Groot-Brittannië. Op al deze kruispunten was een snelheidsbeperking van 30 tot 40 mijl per uur van toepassing (48 tot 64 km/u). Uit de beschrijving kan niet worden afgeleid of een vergelijkingsgroep werd gebruikt:

- Op 88 kruispunten die voordien voorrangsgeregeld waren bleek het aantal ongevallen met gewonden met 34% te zijn gedaald. Voor de ongevallen met doden en zwaargewonden bleek dit cijfer nog hoger: 45%.
- Op 13 kruispunten die voordien werden geregeld met verkeerslichten, verminderde het aantal ongevallen met doden of zwaargewonden met 62%.

Ander onderzoek mat de effecten op de onveiligheid van rotondes op kruispunten met vier takken in vergelijking met kruispunten met drie takken. Het onderzoek wees uit dat de reductie-effecten op rotondes met vier takken mogelijk groter zijn dan op rotondes met drie takken, maar ook dit effect is onzeker (Elvik, 2003).

6.4.8 *Invloed van ontwerp- en omgevingselementen op de verkeersveiligheid*

a. Karakteristieken van het verkeer

◆ **Verkeersintensiteit en gereden snelheid**

Brüde en Larsson (2000) onderzochten de relatie tussen verkeersintensiteit, snelheid en de onveiligheid op 182 rotondes. Zij vonden een recht evenredig verband tussen de snelheid en het aantal ongevallen. Het aantal gekwetsten verhiel zich zelfs kwadratisch met de snelheid. Er was een licht positief verband tussen de verkeersintensiteit en het aantal ongevallen en tussen de verkeersintensiteit en het aantal gekwetsten.

◆ **Toegelaten snelheid**

Maycock en Hall (1984) (geciteerd in Brown, 1995) vonden geen enkel verband tussen de toegelaten snelheid op de toeritten van de rotonde en het aantal of type van de ongevallen. De Brabander et al. (2005) vonden een gunstiger effect op het aantal ongevallen voor rotondes op kruisingen van een hoofdweg met een toegelaten snelheid van 90 km/u met een weg met een toegelaten snelheid van 50 of 70 km/u dan op wegen met een ander snelheidsregime.

b. Elementen uit de omgeving

◆ **Binnen/buiten bebouwde kom**

In enkele onderzoeken werd vastgesteld dat de reductie van het aantal slachtoffers groter is op rotondes buiten bebouwde kom dan binnen bebouwde kom (Schoon & van Minnen, 1993; MET, 2003). In de Verenigde Staten werd een groter effect op stedelijke rotondes dan op rotondes in landelijke omgeving gevonden (Persaud, 2001 – zie ook Tabel 3 op pagina 42).

◆ **Kruispunten met 3 of 4 takken**

Elvik (2003) vond een grotere afname van ongevallen op rotondes met 4 takken dan op rotondes met 3 takken, maar bestempelde het als onzeker.

c. Elementen in het wegontwerp

◆ **Middeneiland**

Elvik (2003) vond in een meta-analyse van 28 onderzoeken over de onveiligheid van rotondes erg weinig onderzoeken die de relatie van specifieke ontwerp-elementen tot de verkeersveiligheid in ogenschouw namen. De vaakst onderzochte parameter is de omvang (diameter) van het middeneiland. Het merendeel van de beschouwde onderzoeken, maar niet allemaal, kwam tot de vaststelling dat een kleiner middeneiland gunstiger was voor de verkeersveiligheid. In Groot-Brittannië daarentegen werd gevonden dat het verkleinen van het middeneiland met als doel de capaciteit te vergroten, ongunstige effecten heeft op het aantal ongevallen (Brown, 1995).

Maycock en Hall (1984) (geciteerd in Brown, 1995) vonden dat het ongevallenpatroon van kleine rotondes ook verschilt van dat van grotere rotondes. 71% van de ongevallen op kleine rotondes betrof aanrijdingen tussen oprijdend en rondrijdend verkeer (inclusief fietsers) terwijl op de grote rotondes de ongevallen gelijk verdeeld waren tussen 3 types: aanrijdingen tussen oprijdend en rondrijdend verkeer, eenzijdige ongevallen, en aanrijdingen bij het wisselen van rijstrook en/of het afslaan.

Brüde en Larsson (2000) onderzochten de invloed van enkele specifieke ontwerpelementen van rotondes op de verkeersveiligheid. Ze onderzochten snelheidskenmerken op 536 rotondes in Zweden en maten zowel de snelheid tijdens het naderen van de rotonde, op de rotonde zelf en weggrijdend van de rotonde. Aan de hand van een regressie-analyse werden de effecten van een aantal variabelen geschat. Het aldus opgebouwde model toonde een (logische) samenhang tussen toegelaten en gemeten snelheid. Een andere conclusie was dat de gemiddelde snelheid lager werd wanneer de diameter van het middeneiland zich in het interval 10-20 meter bevindt ten opzichte van rotondes met een groter of kleiner middeneiland.

◆ **Aantal rijstroken**

Brüde en Larsson (2000) vonden dat de snelheid hoger is bij meerstrooksrotondes. In de Verenigde Staten was de reductie van het aantal ongevallen op meerstrooksrotondes veel kleiner dan op enkelstrooksrotondes. Het effect was bovendien niet statistisch significant (Persaud et al., 2001 – zie ook Tabel 3 op pagina 42).

◆ **Aansluitbogen toerit**

Maycock en Hall (1984) (geciteerd in Brown, 1995) stelden vast dat het aantal ongevallen 8,5 hoger is bij rotondes met een aansluiting die toelaat om zonder draaibeweging op te rijden dan bij rotondes waar de voertuigen een sterke draaiende beweging dienen te maken. Brüde en Larsson (2000) kwamen tot gelijkaardige bevindingen op basis van de gemeten snelheid van voertuigen. Zij vonden dat de snelheid lager wordt indien het toeleidende wegvak naar links wordt afgebogen op het punt van de aansluiting op de rotonde (met andere woorden indien de boogstraal van de rijcurve van de voertuigen kleiner wordt en de voertuigen dus een engere bocht moeten maken).

Maycock en Hall (1984) (geciteerd in Brown, 1995) vonden ook dat het 'natuurlijke pad' (de rijcurve die in de werkelijkheid wordt gereden) een betere verklarende variabele blijkt voor de onveiligheid dan de geometrische aansluitbogen van de toeritten op de rotondes. Dit begrip werd later ook geïntroduceerd in de Britse richtlijnen voor wegontwerp.

◆ **Toerit**

Maycock en Hall (1984) (geciteerd in Brown, 1995) vonden een significante correlatie tussen enerzijds de breedte van de overgang tussen de toerit en de rotonde (= "entry width") en anderzijds het optreden van twee ongevaltypes. Het aantal aanrijdingen tussen oprijdend en rondrijdend verkeer bleek significant hoger bij rotondes met bredere overgangen. Het aantal zijdelingse aanrijdingen bij het wisselen van rijstrook en/of verlaten van de rotonde bleek ook te correleren, maar in negatieve zin. Een smallere overgang van toerit naar rotonde hing dus samen met meer ongevallen van dit type.

De breedte van de toerit zelf had enkel een invloed op het aantal eenzijdige ongevallen. Dit laatste bleek significant toe te nemen bij toenemende breedte van de toerit.

Uit dit onderzoek bleek eveneens dat de hoek tussen de verschillende takken van een rotonde een invloed had op het aantal ongevallen. Hoe groter de hoek tussen een tak en de volgende tak, hoe minder ongevallen van het type 'aanrijdend tussen oprijdend en rondrijdend verkeer' bleken voor te komen.

◆ **Overrijdbare strook**

Brüde en Larsson (2000) vonden dat het voorzien van een bijkomende overrijdbare strook rond het middeneiland geen effect op de snelheid bleek te hebben.

◆ **Helling van de rotonde**

Uit het onderzoek van Maycock en Hall (1984) (geciteerd in Brown, 1995) bleek de hellingsgraad van een rotonde slechts een marginale invloed te hebben op twee ongevaltypes: opgaand versus rondgaand verkeer en zijdelingse aanrijdingen. Bovendien bleek in het onderzochte staal van rotondes slechts een kleine variatie te bestaan in de hellingsgraad.

◆ **Zichtafstand**

Maycock en Hall (1984) (geciteerd in Brown, 1995) toonden aan dat het aantal ongevallen voor twee ongevaltypes (eenzijdige ongevallen en zijdelingse ongevallen) significant toeneemt bij een grotere zichtafstand. Met zichtafstand wordt de afstand bedoeld tot waarop weggebruikers rondom het middeneiland kunnen kijken. Voor de aanrijdingen tussen oprijdend en rondrijdend verkeer werd geen significant verband vastgesteld.

7. CONCLUSIES I.V.M. VEILIGHEIDSEFFECTEN

Uit de verschillende uitgevoerde onderzoeken kunnen een aantal algemene conclusies getrokken worden ten aanzien van de effecten van de aanleg van rotondes op de verkeersveiligheid:

- De meest betrouwbare onderzoeken naar de veiligheidseffecten van rotondes zijn voor- en nastudies die corrigeren voor effecten van trends en regressie naar het gemiddelde. Nogal wat onderzoeken houden geen rekening met minstens één van deze effecten.
- Rotondes verbeteren de verkeersveiligheid. Het onderzoek van De Brabander et al. (2005) geeft een cijfer voor rotondes op gewestwegen in Vlaanderen. Na aanleg van deze rotondes is het aantal ongevallen met minstens een lichtgewonde gedaald met gemiddeld 34%. Het aantal ongevallen met minstens een zwaargewonde daalde met gemiddeld 38%. De gevonden resultaten zijn statistisch significant.
- Uit alle onderzoeken blijkt dat het effect van rotondes op zwaardere ongevallen groter is dan op ongevallen met lichtere afloop of op ongevallen met uitsluitend materiële schade. Voor deze laatste categorie is het effect onzeker.
- Omvorming van een kruispunt tot een rotonde zorgt ervoor dat de snelheden op en in de omgeving (tot 300 m) van het kruispunt significant dalen. Er bestaat tevens een verband tussen de snelheid en de laterale verplaatsing die op de rotonde dient afgelegd te worden. Deze laatste wordt bepaald door de diameter van het middeneiland en de aansluithoek van de toerit op de rotonde.
- De afname van het aantal ongevallen is vermoedelijk, maar niet zeker, groter op voorrangsgeregelde kruispunten dan op lichtengeregelde kruispunten.
- Waarschijnlijk zorgt de aanleg van rotondes voor een afname van het aantal letselongevallen bij fietsers. Zeker is deze conclusie echter niet. De waargenomen daling in het aantal letselongevallen is lager voor fietsers dan voor letselongevallen met andere weggebruikers.
- Er bestaat geen sluitende evidentie over het verschil in onveiligheid naargelang het type fietsvoorziening: vrijliggend fietspad, aanliggend fietspad, geen fietsvoorziening. De gevonden resultaten laten toe om te besluiten dat rotondes met vrijliggende fietspaden waarschijnlijk veiliger zijn voor fietsers dan rotondes met aanliggende fietspaden of rotondes met gemengd verkeer.
- Vrijliggende fietspaden met fietsers in de voorrang hebben gemiddeld een iets hogere frequentie fietsongevallen dan vrijliggende fietspaden met fietsers uit de voorrang.
- De frequentie van ongevallen met voetgangers ligt op rotondes lager dan op lichtengeregelde kruispunten.
- Er bestaat een recht evenredig verband tussen de rijsnelheid en het aantal ongevallen op rotondes en een positief verband tussen de verkeersintensiteit en het aantal ongevallen.
- Een kleiner middeneiland is vermoedelijk gunstiger voor de verkeersveiligheid dan een groter middeneiland. Voor fietsers evenwel, is een groter middeneiland waarschijnlijk gunstiger.

Deze onderzoeksresultaten bevestigen grotendeels de theoretische hypothesen over de gunstige effecten op de verkeersveiligheid:

- Het aantal ongevallen met gekwetsten daalt significant na de aanleg van een rotonde. Het aantal ongevallen met zware afloop daalt sterker dan het aantal ongevallen met lichtere afloop (Persaud et al., 2001; De Brabander et al., 2005; Elvik, 2003)
- De snelheid van het verkeer dat de rotonde nadert en ervan wegrijdt is significant lager dan in de periode voor de aanleg van de rotonde. Het effect wordt gemeten tot op 300 meter van de rotonde (Hydén & Várhelyi, 2000; van Minnen, 1994)

Wat de conflictsituaties betreft, wordt echter geen volledige evidentie gevonden voor de theorie: terwijl rotondes het aantal conflictpunten theoretisch reduceren van 32 naar 8 (voor enkelstrooksrotondes) (Elvik & Vaa, 2004; FHWA, 2000) leren de uitgevoerde conflictobservaties (van Minnen, 1994; Hydén & Várhelyi, 2000) dat het aantal conflicten op rotondes niet vermindert. Dit betekent logischerwijze dat het aantal optredende conflicten per conflictpunt op een rotonde hoger is dan op een klassiek kruispunt. Er is echter nog geen eenduidig verband gevonden tussen het optreden van conflicten en het zich werkelijk voordoen van ongevallen (Hauer, 1997), waardoor uit dit gegeven geen eenduidige conclusies kunnen getrokken worden. Niettemin kan gesteld worden dat de reden waarom de verkeersonveiligheid op rotondes daalt, mogelijk vooral moet gezocht worden in de sterk gereduceerde snelheid bij het optreden van de conflicten waardoor de kans op een ongeval met grote letselernst lager is, eerder dan in het verminderen van het aantal of het verschuiven van de aard van de conflicten.

8. AANBEVELINGEN

Op basis van de vaststellingen in dit rapport kunnen enkele aanbevelingen gedaan worden over verder onderzoek in verband met de veiligheidsaspecten van rotondes en over de toepassing van rotondes in Vlaanderen:

- Te onderzoeken elementen blijven bestaan: de invloed van specifieke geometrische elementen (dimensie, aansluitbogen, aantal rijstroken, verlichting,...) van rotondes op de verkeersveiligheid, de effecten van rotondes voor verschillende types weggebruikers (vb. fietsers, voetgangers, motorrijders,...) en de effecten van enkele bijzondere vormen van rotondes zoals turborotondes, minirotondes, ovondes etc. Specifiek voor Vlaanderen is onderzoek naar de effecten van verschillende soorten fietsvoorzieningen alleszins van belang. Verder is onderzoek naar het verschil in veiligheidseffect van een rotonde naargelang de voorsituatie (omgevingskenmerken, vormgeving kruispunt, verkeersintensiteiten en –samenstelling) op het kruispunt nuttig.
- In het rapport werd geconcludeerd dat de richtlijnen vaak een vrij grote keuzevrijheid aan de ontwerper laten. Het zou nuttig zijn om een inventaris te maken van de gangbare praktijk bij de aanleg van rotondes in Vlaanderen. Dit kan best gebeuren door een terreinobservatie uit te voeren van een aantal kenmerken van bestaande rotondes (omvang rotonde, omvang middeneiland, aantal rijstroken, fietsvoorzieningen, voetgangersvoorzieningen,...). De data die uit een dergelijke inventaris verkregen worden kunnen alleszins gebruikt worden voor verder onderzoek zoals hierboven beschreven en voor beheersdoeleinden door de wegenadministratie. Daarnaast leveren ze interessante informatie op over de frequentie waarin bepaalde types van rotondes (meerstrooksrotondes, dubbele toeritten, vrijliggende fietspaden, dubbele rotondes, compacte rotondes, rotondes binnen bebouwde kom enz.) in de praktijk voorkomen.
- Het Vlaamse Vademecum Rotondes bestaat sinds 1997 en is aan actualisatie toe. De hierboven vermelde inventarisatie kan uitwijzen in welke mate sommige richtlijnen in het Vademecum al dan niet in de praktijk werden uitgevoerd, om welke reden dan ook. Een beter kennis over de realiteit kan waarschijnlijk tot aanpassingen of verfijningen in het Vademecum leiden. Daarnaast is ook de praktijkervaring met rotondes in Vlaanderen aanzienlijk toegenomen sinds 1997 en zijn bijkomende onderzoeksresultaten en ervaringen in het buitenland beschikbaar.

9. GERAADPLEEGDE BRONNEN

Literatuur

- AVV (2005). *Kerncijfers verkeersveiligheid, uitgave 2005*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Adviesdienst voor Verkeer en Vervoer. Beschikbaar op www.rws-avv.nl.
- Brilon, W., Vandehey, M. (1998). Roundabouts – the State of the Art in Germany. *ITE Journal*. Nov 1998, pp. 48-54.
- Brown, M. (1995). *The Design of Roundabouts: State-of-the-art Review*. London: Transport Research Laboratory.
- Brüde, U., Larsson, J. (1996). *The safety of cyclists at roundabouts: a comparison between Swedish, Danish and Dutch results*. VTI-meddelande 810A. Linköping, Sweden: Swedish National Road and Transport Research Institute.
- Brüde, U., Larsson, J. (2000). What roundabout design provides the highest possible safety? *Nordic Road and Transport Research*, 2/2000, pp. 17-21.
- CERTU (1999). *Carrefours urbains, guide*. Lyon, France, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques.
- CERTU (2000). *Giratoires en ville, mode d'emploi*. Lyon, France, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques.
- CETUR (1992). *La sécurité des carrefours giratoires: en milieu urbain ou péri-urbain*. Bagneux, France, Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et de l'Espace. Centre d'Études des Transports Urbains.
- CROW (1998). *Eenheid in rotondes*. CROW-publicatie 126. Ede, Nederland.
- CROW (2002). *Fietsoversteken op rotondes: supplement bij publicatie 126 'Eenheid in rotondes'*: CROW-publicatie 126a. Ede, Nederland.
- Daniels, S., Wets, G. (2005). Traffic Safety Effects of Roundabouts: a review with emphasis on Bicyclist's Safety. *Proceedings of the 18th ICTCT-workshop*. Helsinki, Finland, www.ictct.org.
- Debaere, K., Vandeputte, J. (1997). Aanbevelingen voor de aanleg van rotondes. In *Vademecum Rotondes*, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Brussel.
- De Brabander, B., Nuyts, E., Vereeck, L. (2005). *Road Safety Effects of Roundabouts in Flanders*. Rapport RA-2005-63, Diepenbeek, Steunpunt Verkeersveiligheid.
- Dijkstra, A. (2004). *Rotondes met vrijliggende fietspaden ook veilig voor fietsers: rapport R-2004-14*. Leidschendam. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid.
- Donné, V. (1997). Verlichting van rotondes. In *Vademecum Rotondes*, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Brussel.
- Donné, V. (2005). Soms zou een minirotonde een goede oplossing zijn: wetswijziging nodig om minirotonde in België toe te laten. *Verkeersspecialist 117*, april 2005, pp. 7-11.
- Elvik, R. (2002). The importance of confounding in observational before-and-after studies of road safety measures. *Accident Analysis and Prevention 34*, pp. 631-635.

- Elvik, R. (2003). Effects on Road Safety of Converting Intersections to Roundabouts: Review of Evidence from Non-U.S. Studies. *Transportation Research Record 1847*, pp. 1-10.
- Elvik, R., Vaa, T. (2004). *The Handbook of Road Safety Measures*. Amsterdam, Elsevier.
- Evans, L. (2004). *Traffic Safety*. Bloomfield Hills, Michigan, USA, Science Serving Society.
- Flannery, A. (2001). Geometric Design and Safety Aspects of Roundabouts. *Transportation Research Record 1751*, pp. 76-81.
- FHWA (2000). *Roundabouts: an Informational Guide*. McLean, Virginia: United States Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- GBHA (1993). *Design Manual for Roads and Bridges: Geometric Design of Roundabouts - TD 16/93*. London: Great Britain Highways Agency.
- GBHA (1997). *Design Manual for Roads and Bridges: Design of Road Markings at Roundabouts – TD 78/97*. London: Great Britain Highways Agency.
- Hauer, E. (1997). *Observational Before-After Studies in Road Safety: Estimating the Effect of Highway and Traffic Engineering Measures on Road Safety*. Oxford. Pergamon Press.
- Hydén, C., Várhelyi, A. (2000). The effects on safety, time consumption and environment of large scale use of roundabouts in an urban area: a case study. *Accident Analysis and Prevention 32*, pp. 11-23.
- Lauwers, D. (1997). Verkeerstechnisch ontwerp van rotondes. In *Vademecum Rotondes*, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Brussel.
- Maycock, G., Hall, RD. (1984). *Accidents at 4-arm roundabouts. TRRL-report LR 1120*. Crowthorne, United Kingdom: Transport and Road Research Laboratory, Department of Transport (geciteerd in Brown, 1995).
- MET (1999). *Vade-mecum pour la conception des carrefours giratoires*. Namur, Ministère Wallon de l'Équipement et des Transports.
- MET (2003). *Evaluation et Accidentologie des giratoires et feux tricolores*. Namur, Ministère Wallon de l'Équipement et des Transports.
- MVG (2000). *Standaardbestek 250 voor de wegenbouw – versie 2.0*. Brussel, ministerie van de Vlaamse Gemeenschap.
- MVG (2001). *Vademecum Fietsvoorzieningen*. Brussel, ministerie van de Vlaamse Gemeenschap.
- Nuyts, E., Cuyvers, R. (2003). *Effectiviteitsmeting bij Voor-Na studies met een vergelijkingsgroep: Rapport 2003-22*. Diepenbeek, Steunpunt Verkeersveiligheid.
- OECD (1997). *Road Safety Principles and Models: Review of Descriptive, Predictive, Risk and Accident Consequence Models*. Paris, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Ogden, K.W. (1996). *Safer Roads: A Guide to Road Safety Engineering*. Hants, England, Ashgate Publishing.
- Persaud, B., Retting, R., Garder, P., Lord, D. (2001). Safety Effects of Roundabout Conversions in the United States: Empirical Bayes Observational Before-After Study. *Transportation Research Record 1751*, pp. 1-8.
- Poté, R. (1997). Voorrang op rotondes kritisch bekeken. *Verkeersspecialist, november 1997*, p.9-10.
- Poté, R., Verbruggen, H. (2002). *Verkeerslexicon: Actuele Verkeerskundige en – wettelijke begrippen*. Diegem, Kluwer.

- Räsänen, M., Summala, H. (2000). Car Drivers' Adjustment to Cyclists at Roundabouts. *Transportation Human Factors* 2(1), pp. 1-17.
- Reekmans, S., Nuyts, E., Cuyvers, R. (2004). *Effectiviteit van infrastructurale verkeersveiligheidsmaatregelen: Rapport RA-2004-39*. Diepenbeek, Steunpunt Verkeersveiligheid.
- RSV (1998). *Ruimtelijk Structuurplan Vlaanderen*. Brussel, ministerie van de Vlaamse Gemeenschap.
- Schoon, C.C., Van Minnen, J. (1993). Ongevallen op rotondes II: *Tweede onderzoek naar de onveiligheid van rotondes vooral voor fietsers en bromfietzers: rapport R-93-16*. Leidschendam, Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid
- Thai, M., Balmefrezol, P. (2000). Design of Roundabouts in France: Historical Context and State of the Art. *Transportation Research Record* 1737, pp. 92-97.
- Van Minnen, J. (1994). *Voor- en nastudies op rotondelocaties: rapport R-94-61*. Leidschendam. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid.
- Van Minnen, J., Braimaster, L. (1994). *De voorrangregeling voor fietsers op rotondes met fietspaden: rapport R-94-73*. Leidschendam. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid.
- Van Minnen, J. (1995). *Rotondes en voorrangregelingen: rapport R-95-68*. Leidschendam. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid.
- Van Minnen, J. (1998). *Rotondes en voorrangregelingen II: rapport R-98-12*. Leidschendam. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid.
- Vanreusel, J. (1997). Typologie en plaats van rotondes. In *Vademecum Rotondes*, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Brussel.

Wetgeving

- Koninklijk besluit van 1 december 1975 houdende algemeen reglement op de politie van het wegverkeer en van het gebruik van de openbare weg (B.S. 09.12.1975).
- Koninklijk besluit van 11 maart 1997 tot wijziging van het koninklijk besluit van 1 december 1975 houdende algemeen reglement op de politie van het wegverkeer (B.S. 18.03.1997).
- Koninklijk besluit van 4 april 2003 tot wijziging van het koninklijk besluit van 1 december 1975 houdende algemeen reglement op de politie van het wegverkeer (B.S. 08.05.2003).
- Ministerieel besluit van 11 oktober 1976 houdende de minimum afmetingen en de bijzondere plaatsingsvoorwaarden van de verkeerstekens (B.S. 14.10.1976).

10. BIJLAGE 1: BEGRIPPENLIJST

Aansluitboog	De aansluitboog van de toerit is de overgangsboog tussen de toerit en de rotonde. De aansluitboog van de afrit is de overgangsboog tussen de rotonde en de afrit (CROW, 1998).
Binnenstraal	De binnenstraal is de afstand van het middelpunt van de rotonde tot aan de buitenkant van het middeneiland, inclusief de verhoogd overrijdbare strook (CROW, 1998).
Buitenstraal	De buitenstraal is de afstand van het middelpunt van de rotonde tot aan de buitenkant van de verharding van de rijbaan. Een vrijliggend fietspad wordt hier niet in meegerekend, een gemarkeerde fietsstrook of een aanliggend fietspad daarentegen wel (CROW, 1998).
Conflictpunt	Als een conflictpunt wordt elk punt beschouwd waarop de trajecten van weggebruikers (gemotoriseerde voertuigen, maar ook voetgangers of fietsers) vlak achter mekaar lopen, zich samenvoegen, kruisen of zich verspreiden (FHWA, 2000).
Deflectie	Zijdelingse verplaatsing bij het oprijden van de rotonde.
Eenzijdig ongeval	Ongeval waarbij slechts één weggebruiker betrokken is. Niettemin kunnen er bij een eenzijdig ongeval meerdere slachtoffers vallen (vb. 3 gewonden in een auto die tegen een boom rijdt).
Langshelling	Helling van de rijweg in de lengterichting.
Middeneiland	Het middeneiland van een rotonde is de verhoogde, niet overrijdbare zone die volledig wordt omsloten door de rondgaande rijstrook (FHWA, 2000). De eventueel aanwezige overrijdbare strook maakt deel uit van het middeneiland.
Natuurlijke pad	Rijcurve die in werkelijkheid door een groot aantal weggebruikers wordt gereden.
Ontwerpvoertuig	Ook wel maatgevend voertuig genoemd. Moet het grootste mogelijke voertuig zijn dat zich in normale omstandigheden op de rotonde kan begeven en dat daardoor een aantal vereiste afmetingen bepaalt.
Overrijdbare strook	Het middeneiland kan zodanig worden aangelegd dat het buitenste gedeelte licht verhoogd is en daardoor overrijdbaar is.
Plein	Open ruimte, waarop een openbare weg uitkomt of meerdere openbare wegen samenkomen. Kan, maar hoeft geen rotonde te zijn.
Rijbaan	Gedeelte van de weg dat bestemd is voor het verkeer van voertuigen. De rijbaan bestaat uit één of meerdere rijstroken.
Rijstrook	Elk deel van een rijbaan die in haar langsricting verdeeld is door hetzij één of meer witte doorlopende of onderbroken strepen, hetzij voorlopige markeringen.
Verkanting	De verkanting is de dwarshelling van de rijweg die, behalve voor de afwatering, er in bochten moet voor zorgen dat de

invloed van de middelpuntvliedende kracht op voertuigen wordt gecompenseerd (Poté & Verbruggen, 2002). Bij rotondes is de dwarshelling negatief. De rijweg helt bijgevolg af naar de buitenkant.

Voertuig

Elk middel van vervoer te land, alsmede alle verrijdbaar landbouw- of bedrijfsmaterieel. Ook een bereden fiets is een voertuig (K.B. 1/12/1975).

Weggebruiker

Elke persoon die gebruik maakt van de openbare weg (K.B. 1/12/1975).

Bijlage 2: vergelijkende tabel aanbevelingen i.v.m. geometrie

	VLAANDEREN	WALLONIE	NEDERLAND	GROOT-BRITANNIE	VERENIGDE STATEN	FRANKRIJK
Bron	LAUWERS, 1997; DEBAERE & VANDEPUTTE, 1997)	(MET, 1999)	(CROW, 1998; CROW, 2002)	(GBHA, 1993; GBHA, 1997; BROWN, 1995)	(FHWA, 2000)	(CERTU, 1999; CERTU, 2000; CETUR, 1992)
Dimensie (buitendiameter)	Grote: 35-50 m. Geen maximum afmeting. Compacte: 25-40m. Mini: 18-25m.	14-40 m (enkelstrooks) 36-80m (dubbelstrooks)	32-36 m (enkelstrooks) 40-76 m (dubbelstrooks)	Normale: middeiland >= 4m Mini: middeiland < 4m (enkel indien snelheid op elke toerit lager dan 30mph = 48 km/u)	Mini: 13-25m Stedelijk compact: 25-30m Stedelijk enkelstrooks: 30-40m Stedelijk dubbelstrooks: 45-55m Landelijk enkelstrooks: 35-40m Landelijk dubbelstrooks: 55-60m	Mini: 15-24m Normaal: 30m-50m. Geen maximum
Binnendiameter (incl overrijdbare strook)	Mini: 8-13m Compact: 13-24,4m Grote: 22-24 tot 30m	Enkelstrooks: 4-30m Dubbelstrooks: 18-64m 3 stroken: 20-56m	Enkelstrooks: 21-25,5m Dubbelstrooks: 20-60m	Zie dimensie. Entry deflection (=zijdelingse verplaatsing) moet hoog genoeg zijn om snelheid af te remmen. Wordt beschouwd als een kritiek gegeven, maar geen kwantificering gevonden.		Mini: 3-5m Normaal: 16-35m
Voorrang	Verkeer op rotonde heeft altijd voorrang	Verkeer op rotonde heeft altijd voorrang	Verkeer op rotonde heeft altijd voorrang	Verkeer op rotonde heeft altijd voorrang	Verkeer op rotonde heeft altijd voorrang	Verkeer op rotonde heeft altijd voorrang
Enkel- of meerstrooks?	Omwille van veiligheid best enkelstrooks.	Zo klein mogelijk aantal stroken tenzij meer nodig o.w.v. capaciteit	Bij voorkeur enkelstrooks. 'Grote terughoudendheid' t.a.v. dubbelstrooksrotondes, vooral o.w.v. medegebruik langzaam verkeer dat veiligheidsprobleem creëert.	Niet meer dan nodig omwille van de capaciteit, maar geen beperking omwille van veiligheid.	Enkel- of dubbelstrooks	Niet meer dan nodig voor de capaciteit.
Aantal rijstroken toerit en uitrit	Sterke voorkeur voor slechts 1.	Voorkeur voor slechts 1. Indien onvoldoende eventueel met korte opstelstrook werken.	Op enkelstrooksrotondes 1 rijstrook toerit en afrit. Op dubbelstrooksrotondes bij voorkeur slechts één rijstrook op de afrit omw veiligheid overstekende fietsers. Indien capaciteit voldoende ook toerit beperken tot één rijstrook.	Niet meer dan nodig, maar geen beperking omwille van veiligheid.	Niet meer dan nodig, maar geen beperking omw veiligheid.	Voorkeur voor slechts 1. Bij druk verkeer zijn 2 of 3 rijstroken op de toeritten en uitritten mogelijk, hoewel niet aangewezen bij druk fiets- of voetgangersverkeer.

	VLAANDEREN	WALLONIE	NEDERLAND	GROOT-BRITTANNIE	VERENIGDE STATEN	FRANKRIJK
Capaciteit	Enkelstrooks: 2000-2500 pae/u Dubbelstrooks: 3500-4000 pae/u	>= 2000 mvt/u + verwijzing naar beschikbaar rekenblad	Vuistregel: Enkelstrooks: 20000-25000 mvt/24u Dubbelstrooks: 35000-40000 mvt/24u	Geen cijfers	1800 vtg/u (enkelstrooks) 3400 vtg/u (dubbelstrooks)	>= 1500 mvt/u. Bij grotere waarden afhankelijk van verdeling verkeer op toeritten en uitritten + verwijzing naar rekenblad.
Hoek aansluiting toeritten	Radiaal (met uitbuiging op einde toerit)	Tussen 40 en 60° (evenwicht tussen veiligheid en capaciteit); > 60°: te vermijden (rechte nadering verkleint capaciteit met 10 a 20%) <40°: verboden Op takken met weinig verkeer: eventueel haaks aansluiten en ook geen middengeleider voorzien.	Zoveel mogelijk radiaal	Eerder tangentieel	Eerder tangentieel. Verschil in snelheid tussen verkeer dat d rotonde oprijdt en verkeer op de rotonde zelf mag niet meer dan 20 km/u zijn (= elementaire principe dat de vormgeving bepaalt). Er wordt echter uitdrukkelijk gewaarschuwd voor al te tangentiële aansluitingen. Eventueel wel kleine verschuiving naar links van de toerit om de aansluiting op de rotonde vloeiend te maken.	Radiaal (stedelijke rotondes)
Rijbaan-breedte op de rotonde	Mini: 6m Compact: 5,3-6m Grote: 5m (enkelstrooks), 8-9m (dubbelstrooks)	5m (min)-8m (max) (enkelstrooks) 8-9m (dubbelstrooks) 11-12m (driestrooks) Vuistregel: rijstrook 1 tot 1,2 X breedte breedste toerit	5,25-5,5 m (enkelstrooks) 8-10m (dubbelstrooks)	"Niet te breed" zonder specificatie	Enkelstrooks: vuistregel 120% van de toeritbreedte. Dubbelstrooks: 8,7 - 9,8 m	Minimaal 120% van de breedte van de breedste toerit. Dit betekent minimaal 7m. 6m is aanvaardbaar indien er een overrijdbare strook voorzien wordt. Nooit meer dan 9m, zelfs bij dubbelstrooksrotonde.

	VLAANDEREN	WALLONIE	NEDERLAND	GROOT-BRITTANNIE	VERENIGDE STATEN	FRANKRIJK
Breedte overrijdbare strook	1,5m	Enkelstrooks: 2-4m Dubbelstrooks: nvt (bij meer dan 1 rijstroken wordt er impliciet van uit gegaan dat overrijdbare strook niet nodig is)	1,5m	Wordt niet behandeld.	Overrijdbare strook kan ladingverschuiving bij vrachtwagens veroorzaken en vermindert capaciteit rotondes. Daarom enkel toepassen indien gewenste deflectie niet op een andere wijze kan bekomen worden. Aanbevolen breedte = 1 tot 4 m, verkanting 3 tot 4% dalend vanaf het middeneiland. Hoogteverschil van min. 3 cm t.o.v. rijweg om gebruik door personenwagens te voorkomen.	Overrijdbare strook mogelijk, maar niet verplicht. 1,5-2m breed; Indien geen overrijdbare strook, lage boordsteen te voorzien.
Breedte toerit	3,2-4m	4m (enkelstrooks) 7m (dubbelstrooks) 10,5m (driestrooks)	3,5-4m	Geen maatvoering, meerdere rijstroken wordt gemakkelijk aangeprezen.	4,3 tot 4,9 m (naargelang omstandigheden is meer of minder mogelijk)	3-4m (gemeten op 5m van de aansluiting op de rotonde). 2,5m aanvaardbaar voor ondergeschikte takken. 2-strooks: 6-7m
Straal aansluitbogen toerit	8-12m	10-20m	8-12m 12m indien OV-route of veel vrachtverkeer	Maximale bochtstraal bij oprijden rotonde = 100m (stemt ongeveer overeen met straal aansluitboog van 30m). De keuze wordt gelaten tussen 'flared' (uitwaaierende) en 'unflared' entries. Bij hoge fietsintensiteiten (zonder kwantificering) worden "unflared" entries aanbevolen.	54-73m (enkelstrooks) 65-93m (dubbelstrooks) Ontwerpsnelheid voor deze stralen tssn 41-50 km/u! Let wel: het gaat om boogstralen van de voertuigen (= natuurlijke pad), niet om boogstralen van de rotonde zelf. Straal van de aansluitbogen zelf = 10 tot 30 m (enkelstrooks); groter mag ook. 2-strooks: 15-80m	Nooit groter dan buitenstraal op de rotonde zelf. Aanbevolen 8-15m.
Breedte uitrit	3,5-4,5m	5m (enkelstrooks) 8m(dubbelstrooks) 11m(driestrooks)	4-4,5m	geen maatvoering, meerdere rijstroken wordt gemakkelijk aangeprezen.	geen maatvoering, breedte uitrit bepaald door breedte maatgevend voertuig en gewenste capaciteit.	4-5m 7m (dubbelstrooks)

	VLAANDEREN	WALLONIE	NEDERLAND	GROOT-BRITTANNIE	VERENIGDE STATEN	FRANKRIJK
Straal aansluitbogen uitrit	12-15m	10-30m	12-15m 15m indien OV-route of veel vrachtverkeer	Straal uitritten best groter dan toeritten	Straal uitritten mag niet kleiner zijn dan straal toeritten, om controleverlies over het stuur te vermijden (indien kleiner zou bestuurder tijdens omschrijdende beweging nog moeten bijsturen en vertragen). Straal in de regel niet minder dan 15m, maar indien veel voetgangers mag dit zakken tot 10-12m.	Groter dan binnenstraat van de rotonde met een minimum van 15m
Middengeleiders	Toegepast vanaf diameter middeneiland 15m of hoger	10 tot 60 m lang; breedte ter hoogte van aansluiting op rotonde: tussen 6 en 20 m. Doorsteek voor voetgangers te voorzien op ongeveer 4 m (= lengte van 1 voertuig) van de buitenste rand van de rotonde (= markering "voorrang verlenen"). Op die plaats dient het middeneiland nog minimaal 1,5 tot 2meter breed te zijn om de voetganger vlot en veilig in 2 bewegingen te laten oversteken.	Toegepast vanaf diameter middeneiland 16m of hoger. Minimaal 2,5 m breed bibeko. Bubeko min. 3m breed. Lengte 14-15m. Kop middengeleider aan zijde rotonde 1m terugleggen o.w.v. berijdbaarheid.	Keuze voor al dan niet aanbrengen. Middengeleiders moeten oversteek voetgangers mogelijk maken.	Zie voetgangersvoorzieningen	Onontbeerlijk in bebouwde kom om oversteek voetgangers in 2 tijden mogelijk te maken. Min. 0,8m breed, 2m wenselijk
Positie middeneiland	Wordt niet behandeld	Op convergentiepunt tussen de assen van de verschillende takken	Wordt niet behandeld	Wordt niet behandeld	Wordt niet behandeld	Alleszins op de as van de voornaamste rijrichting. Indien mogelijk ook op de as van de ondergeschikte wegen.

	VLAANDEREN	WALLONIE	NEDERLAND	GROOT-BRITANNIE	VERENIGDE STATEN	FRANKRIJK
Vorm middeneiland	Moet rond zijn.	Moet rond zijn.	Middeneiland best rond. Zeer grote rondes die worden ervaren als een rondlopende weg kunnen een uitzondering zijn. Aankleding middeneiland moet zodanig zijn dat vanop afstand geen doorzicht mogelijk is.	Landscaping/beplanting kan zichtbaarheid middeneiland verhogen en daardoor veiligheid verbeteren	Moet best rond zijn om homogene snelheden te waarborgen en stuurcorrecties op rotonde te vermijden.	Moet bij voorkeur rond zijn.
Verlichting	Middeneiland moet waarneembaar zijn	Kruispunt moet waarneembaar zijn vanop een afstand van 250m aan een snelheid van 90 km/u	Aansluitende wegen over minstens 100m verlicht. Op rotonde zelf masten bij voorkeur aan buitenkant. Middeneiland dient duidelijk herkenbaar te zijn. Rand middeneiland duidelijk markeren, bv. zwart-witte blokmarkering. Lichtniveau minstens 1,5 keer dat van de aansluitende wegvakken.	Rotonde moet waarneembaar zijn (indien mogelijk met verlichting, enkel uitzondering indien er specifieke redenen bestaan, bv. o.w.v. lichthinder in natuurgebieden)	Verlichting is aanbevolen, maar niet steeds mogelijk (bv. in landelijke gebieden). In dat geval moet de rotonde wel goed waarneembaar zijn (bv. door gebruik retroreflecterende materialen)	Steeds verlicht (in bebouwde kom). Middeneiland moet waarneembaar zijn.
Verkanting rijbaan	Niet behandeld	2-2,5% afhellend naar de buitenkant	2-2,5%, afhellend naar buitenkant.	Niet behandeld	2% afhellend naar de buitenkant	1-2% afhellend naar de buitenkant
Voetgangersvoorzieningen	Niet behandeld	Kwalitatieve criteria ivm intensiteiten auto's + voetgangers. Zie ook 'middengeleiders'	Oversteek van fietsers combineren met zebra's, waardoor fietser en voetganger in gelijkaardige positie verkeren en kruising van het langzaam verkeer voor het naderende autoverkeer sterker opvalt.	Oversteken te voorzien een eindje van de rotonde (zonder specificatie over afstand), eventueel met rustpunt op middengeleider. Geen onbeschermd oversteken over meerstrookstoeritten. In dat geval oversteek een eindje verderop voorzien.	Vluchtheuvel in middengeleider moet min. 1,8m breed zijn en op min. 7,5 m van de voorrangslijn liggen (= 1 vtglengte). Doorgang voetgangers moet op straatniveau liggen o.w.v. comfort overstekers. Voetpad rond rotonde moet op min. 0,6m en best 1,5m afstand liggen.	Toeritten: oversteken op 2-5m van de buitenrand van de rotonde. Uitritten: oversteken op 3-10m van de buitenrand van de rotonde. In stedelijke omgevingen steeds middengeleider voorzien.

	VLAANDEREN	WALLONIE	NEDERLAND	GROOT-BRITTANNIE	VERENIGDE STATEN	FRANKRIJK
Fietsvoorzieningen	Voorkeur vrijliggend. Beter geen fietspaden dan aanliggend.	vanaf 800 fietsers/u volledig gescheiden fietsvoorzieningen. Als de effectieve rijsnelheid op de rotonde minstens 50km/u is, worden vrijliggende fietsvoorzieningen aanbevolen. Zowel aanliggende als vrijliggende fietspaden steeds uit de voorrang! In bebouwde kom worden 2 types fietsers onderscheiden: snelle (mengen zich in het gemotoriseerde verkeer) en trage (passeren de rotonde zoals een voetganger).	Minder drukke rotondes (< 6000 auto's/24u): geen fietsvoorziening Drukke rotondes (>10000 auto's/24u): vrijliggende fietspaden aanbevolen Gematigd drukke rotondes (6000<auto's<10000/24u): keuze mee bepaald door aanwezigheid fietspaden op de toeleidende wegvakken Rotondes met een fietsstrook worden afgeraden: bij lage intensiteit niet nodig, bij hoge intensiteit te gevaarlijk	Voorkeur voor gescheiden fietsvoorzieningen (ev. in combinatie met voetpaden) . Indien ruimtelijk of economisch niet mogelijk => rotonde signaleren met verkeerslichten of alternatieve route voor fietsers aanduiden. Men gaat ervan uit dat eens een fietser op een rotonde rijdt, het risico moeilijk te verminderen is.	In het algemeen de fietser de keuze geven tussen gebruik van de rotonde als weggebruiker of als voetganger. Meestal heeft de fietser er baat bij om als weggebruiker beschouwd te worden. Fietspaden dienen 30 meter voor de rotonde stopgezet te worden om de fietser te mengen met het andere verkeer. Om fietsers op te vangen die niet over de rotonde willen rijden, kan een verbreed voetpad gebruikt worden of kunnen gescheiden fietsvoorzieningen worden aangelegd.	Facultatief aanliggende of vrijliggende fietspaden te voorzien. Op minirotondes geen afzonderlijke fietsvoorzieningen. Indien buitenstraal tussen 12 en 22m: fietspad laten eindigen 15m voor de rotonde en kiezen voor rotonde met gemengd verkeer. Indien buitenstraal >22m: aanliggend gemarkeerd fietspad Vrijliggende fietspaden te overwegen indien buitenstraal >20m of indien continuering nodig is van een bestaand fietspad aan beide zijden van een kruispunt.
Rijstrookmarkering op de rotonde	Niet behandeld.	Onderbroken streepmarkering aan te brengen tussen de rijstroken op de rotonde (bij meerstrooksrotondes)	Niet behandeld.	Wegmarkering kan nuttig zijn voor veiligheid en capaciteit. Voorkomt onzekerheid bij weggebruikers.	In het algemeen beter geen rijstrookmarkeringen op de rotonde, ongeacht de grootte. Geven vals gevoel van veiligheid.	Concentrische rijwegmarkering op de rotonde is meestal nutteloos en storend. Verhindert gebruik van het "natuurlijke pad" dat de weggebruiker kiest over de rotonde.
Langshelling	Niet behandeld.	Niet behandeld.	Niet behandeld.	Niet te groot alhoewel niet bewezen is dat rotondes op locaties met grote helling slechter zouden functioneren.	Max 4%, maar ook indien grotere helling moet rotonde niet noodzakelijk als oplossing afgewezen worden.	Max 6%