

Effectief aansluiten



Een onderzoek naar de effecten van schuine aansluitingen op de capaciteit en verkeersveiligheid van rotondes

Erik Klok

Effectief aansluiten

Een onderzoek naar de effecten van schuine aansluitingen op de capaciteit en verkeersveiligheid van rotondes



Universiteit Twente
de ondernemende universiteit

Eindrapport, Deventer, juli 2008

Auteur:

Erik Klok
Studentnummer: s0124044
Universiteit Twente
Civiele Techniek

Bedrijfsbegeleider:

ing. M.P. van de Graaff

UT-begeleider:

drs S.I.A. Tutert

VOORWOORD

In dit rapport wordt mijn onderzoek beschreven naar de effecten van schuinere aansluitingen op de capaciteit en verkeersveiligheid van rotondes. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van mijn bachelor eindopdracht voor de studie Civiele Techniek van de Universiteit Twente. Voor die bacheloropdracht heb ik twaalf weken stage gelopen bij Witteveen+Bos Raadgevende Ingenieurs te Deventer.

Graag wil ik Merel van de Graaff hartelijk bedanken voor de ondersteuning en begeleiding van mijn onderzoek. Zij heeft in een drukke tijd mogelijkheid gezien om mij hulp te bieden en mijn geschreven stukken te lezen. Ook Bas Tutert wil ik bedanken voor zijn inbreng en zijn inspanningen voor het regelen van mijn stageplaats. Ook de derde W+B'er die mij heeft bijgestaan, Gerrit Bekkernens, wil ik graag danken voor zijn hulp en enthousiasme. Verder wil ik de rest van de afdeling waarin ik twaalf weken heb rondgelopen bedanken voor de gezelligheid en de nuttige opmerkingen.

Ook wil ik mijn vader bedanken voor het meedenken over de opdracht, het lezen van mijn tussenversies en buitenlandse brieven en de hulp bij problemen. Ook de rest van mijn familie wil ik bedanken omdat zij het mogelijk hebben gemaakt dat ik naast mijn stage door kon gaan met mijn andere bezigheden zoals sporten.

Als laatste wil ik alle experts bedanken die de moeite hebben genomen om te reageren op mijn stellingen. Aries van Beinum en Wendy Weijermars verdienen een persoonlijke vermelding omdat zijn tijd hebben gemaakt voor een gesprek met mij over rotondes. Ook wil ik Ineke Fijan van de Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid bedanken voor de hulp bij het zoeken naar literatuur.

Ik heb met plezier in Deventer aan deze opdracht gewerkt en ben blij met de opgedane kennis en ervaringen.

Erik Klok, Deventer, juli 2008

SAMENVATTING

Rotondes zijn er in vele soorten en maten. In Nederland zijn de meeste er echter vooral op gericht om de snelheid van de auto's te minderen terwijl de capaciteit van ondergeschikt belang wordt geacht. De vraag is echter of we in Nederland niet te ver zijn doorgeslagen in het verkeersveiligheidsaspect. Daar komt nog bij dat het nog maar de vraag is of capaciteitsverhogende maatregelen ook een negatieve invloed hebben op de verkeersveiligheid van rotondes.

Één van de ingrepen op de geometrie op een rotonde om de capaciteit te verhogen is het schuiner aansluiten van de zijwegen. De schuinite van een aansluiting komt in dit geval terug in de straal van de aansluitboog van de toerit. Er geldt dat hoe groter de straal, hoe schuiner de aansluiting is. Er zou moeten gelden dat door de hogere snelheid op schuinere aansluitingen en een vermindering van de hinder van het verkeer dat afslaat de capaciteit hoger is.

Deze studie richt zich op de effecten van de schuinere aansluitingen op zowel de verkeersveiligheid als de capaciteit van rotondes. De bijbehorende doelstelling is:

Het bepalen van de effecten van schuinere aansluitingen op de capaciteit en de verkeersveiligheid van rotondes.

Om aan deze doelstelling te kunnen voldoen is er literatuuronderzoek gedaan, zijn er tellingen en metingen uitgevoerd en is er ook gebruik gemaakt van bestaande formules voor capaciteit en verkeersveiligheid. Ook is er een taakanalyse en een zichtanalyse uitgevoerd.

Er zijn twee mogelijke capaciteitverschillen op rotondes onderzocht. De afrijcapaciteit en de invloed van het afrit- en rotondeverkeer. Wanneer de invloed van rotonde- en afritverkeer groter is, wordt de capaciteit op de toerit kleiner.

De metingen hebben plaatsgevonden op twee rotondes waarvan er één in Enschede ligt en de andere in Zeewolde. De straal van de aansluitboog in Enschede is 12 meter en in Zeewolde is die 15 meter. De toeritten in Zeewolde zijn dus schuiner aangesloten op de rotonde dan die in Enschede. Vanwege gebrek aan drukte is alleen de afrijcapaciteit van beide rotondes bepaald. Het blijkt dat de afrijcapaciteit in Zeewolde 9% hoger is dan in Enschede. Het vermoeden is echter dat dit niet geheel aan de vormgeving van de toeritten is toe te schrijven, maar ook aan de verschillen in diameters van de rotonde zelf en de verschillen in drukte ter plaatse.

Vanwege deze bedenkingen is ook met een bestaand model het verschil in afrijcapaciteit bepaald. Met dat model wordt een afrijcapaciteitswinst van 3,2% vastgesteld. Dit is beduidend lager dan de meting.

Ook de invloed van het rotonde- en afritverkeer is in ogenschouw genomen. De twee gebruikte formules geven beide een kleinere invloed van het afritverkeer of het rotondeverkeer bij de rotonde met schuinere aansluitingen. De capaciteitswinst is afhankelijk van de hoeveelheid afrit- en rotondeverkeer. Er geldt dat bij meer afritverkeer de capaciteitswinst van de schuine toerit groter is.

Wanneer de beide effecten worden opgeteld komt de capaciteitswinst van de rotonde in Zeewolde ten opzichte van die in Enschede uit op 50 tot 200 pae per uur. De precieze waarde is afhankelijk van het aantal rotonde- en afritvoertuigen.

Voor het bepalen van de verkeersveiligheid is een uitgebreid literatuuronderzoek gedaan. Daaruit kwam naar voren dat er een goed onderscheid gemaakt moet worden tussen drie hoofd ongevaltypen: ongevallen tussen rotonde- en toeritverkeer, kop-staartongevallen en eenzijdige ongevallen. Verder kwamen een aantal aanbevelingen wat betreft het ontwerp van rotondes naar voren. Ook kwamen twee modellen naar voren die gebruikt worden om het aantal ongevallen op rotondes te bepalen. Deze zijn vervolgens ook toegepast.

De twee modellen die zijn gebruikt geven enigszins wisselende uitkomsten. Bij het ene model wordt het aantal ongevallen tussen rotondeverkeer en afritverkeer groter (voor schuin ten op-

zichte van recht) en de andere twee ongevaltypen wordt het aantal ongevallen juist kleiner. Bij het tweede model wordt alleen het aantal kop-staartongevallen groter terwijl de andere twee typen ongevallen minder worden. De taakanalyse is meer in overeenstemming met het eerste model en er zijn ook nog redenen om te twijfelen aan het tweede model. Zo is er bij dat tweede model nog onduidelijkheid over de formules en is de snelheid die gebruikt zou moeten worden niet bekend. Daarom wordt voor het eerste model gekozen voor de uiteindelijke vergelijking van de rotondes.

Met het model blijkt dat het aantal ongevallen tussen rotonde- en toeritverkeer op de rotonde van Zeewolde ongeveer 20% hoger ligt dan in Enschede. Het aantal eenzijdige ongevallen is echter 10% minder en het aantal kop-staartongevallen is 9 % minder. Het aantal ongevallen tussen rotonde- en toeritverkeer is over het algemeen de grootste categorie van de drie. Daarom wordt ook geconcludeerd dat het aantal ongevallen waarschijnlijk licht zal toenemen op schuinere rotondes. Ook de ernst wordt waarschijnlijk wat groter omdat de snelheden hoger liggen. Met behulp van redelijk recente Nederlandse ongevalcijfers op rotondes is berekend wat het algehele effect is van de schuinere aansluitingen. Bij fietsers in de voorrang wordt het aantal ongevallen 12% hoger en bij fietsers uit de voorrang wordt het 2% hoger.

De laatste manier van kijken naar verkeersonveiligheid op rotondes is de zichtanalyse. Daarbij is gekeken naar het zicht van automobilisten op fietsers. De analyse leverde geen grote verschillen op tussen het zicht op de verschillende rotondes. Dit heeft er vooral mee te maken dat het de echte verschillen pas na een fietspad dat rond de rotonde ligt plaatsvinden. De aansluiting van de toerit begint over het algemeen namelijk pas op of vlak voor de vrijliggende fietsstrook. De afbuiging van de auto is dan dus ongeveer gelijk.

Een verbeterslag van dit onderzoek kan gemaakt worden wanneer voor de capaciteit meer metingen ter plaatse worden gedaan. Voor de verkeersveiligheid zou moeten worden gekeken naar ongevaldata. Dit is echter lastig aangezien er in Nederland weinig tot geen rotondes met grote aansluitbogen liggen. Een aanbeveling van dit onderzoek is om een rotonde met te weinig capaciteit waar fietsers uit de voorrang gezet zijn om te bouwen naar een rotonde met schuinere aansluitingen. Dit kan goed worden onderbouwd aangezien de verkeersveiligheid naar verwachting slechts heel licht toeneemt (2%) terwijl er een capaciteitstoename wordt verwacht. Door daar uiteindelijk capaciteitsmetingen te doen kan een beter beeld worden verkregen van de verschillen in capaciteit in de praktijk. Voor de verkeersveiligheid moet waarschijnlijk naar het buitenland worden gekeken. Belangrijk punt is wel dat er wordt gekeken naar rotondes waar grote hoeveelheden fietsers overheen gaan. Twee mogelijkheden zouden dan Vlaanderen en Kopenhagen zijn aangezien daar ook veel fietsers rijden. De vraag is echter of daar rotondes met schuinere aansluitingen zijn.

INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD	3
SAMENVATTING	4
INHOUDSOPGAVE	6
1. PROBLEEMANALYSE	8
1.1. Aanleiding	8
1.2. Doelstelling	8
1.3. Onderzoeksvragen	8
1.4. Relevantie van het onderzoek	9
1.5. Afbakening	9
1.6. Leeswijzer	9
2. DEFINITIES	10
2.1. Capaciteit	10
2.2. Verkeersveiligheid	11
2.3. De elementen van een rotonde	11
2.3.1. Toerit	11
2.3.2. Afrit	11
2.3.3. Conflictpunt	11
2.3.4. Aansluitboog	12
2.3.5. Binnenstraat	12
2.3.6. Buitenstraat	12
2.3.7. Middeneiland	12
2.3.8. Middengeleider	12
3. VARIABELEN	13
3.1. Capaciteit	13
3.1.1. Snelheid	13
3.1.2. Intensiteit rotondeverkeer	13
3.1.3. Afslaand Verkeer	14
3.1.4. Bestuurders	14
3.1.5. Overzicht	14
3.2. Verkeersveiligheid	14
3.2.1. Snelheid	15
3.2.2. Intensiteiten verkeer	15
3.2.3. Rijgedrag	15
3.2.4. Voorrangsregeling	15
3.2.5. Zicht	15
4. ROTONDES	16
4.1. Enschede	16
4.2. Zeewolde	16
5. SNELHEID	17
5.1. Vergelijking formules met werkelijkheid	17
5.2. Berekening snelheden	19
6. CAPACITEIT	20
6.1. Juistheid formule	20
6.2. Afrijcapaciteit	21
6.2.1. Meting	21

6.2.2. ARCADY2	23
6.3. Vormgeving	24
6.3.1. Bovy	24
6.3.2. Brilon	25
6.4. Totale effect	26
6.5. Conclusie	28
7. VERKEERSVEILIGHEID	29
7.1. Literatuur	29
7.1.1. Onderzoeken	29
7.1.2. Overzicht	33
7.2. Taakbelasting	34
7.2.1. Uitkomsten taakanalyse	34
7.2.2. Complexiteit rijtaak	34
7.3. Gebruik van modellen	35
7.3.1. Veiligheidsparameters (Arndt)	35
7.3.2. Slachtoffers (Maycock & Hall)	36
7.3.3. Slachtoffers (Arndt)	37
7.3.4. Keuze Slachtoffermodel	37
7.4. Zichtbaarheid	38
7.5. Conclusie	39
8. CONCLUSIE	40
8.1. Conclusies	40
8.1.1. Beantwoording deelvragen	40
8.1.2. Algehele conclusie	41
8.2. Aanbevelingen	41
9. DISCUSSIE	43
9.1.1. Capaciteit	43
9.1.2. Verkeersveiligheid	44
REFERENTIES	45
DEFINITIELIJST	47
GEBRUIKTE AFKORTINGEN	48
BIJLAGEN	49

1. PROBLEEMANALYSE

In dit hoofdstuk zal aan bod komen waarom dit onderzoek is uitgevoerd en wat er precies wordt onderzocht. Allereerst komt de aanleiding van het onderzoek naar voren. Vervolgens zal worden ingegaan op de doelstelling en de daaruit voortvloeiende onderzoeksvragen. Ook zal nog worden besproken wat de relevantie van het onderzoek is. Tevens is het onderzoek afgebakend en ten slotte is ook nog een leeswijzer toegevoegd.

1.1. Aanleiding

Rotondes zijn er in vele soorten en maten. In Nederland is een rotonde met een rechte aansluiting standaard. In het buitenland zijn er juist voornamelijk rotondes met een meer schuine aansluiting. Het vermoeden bestaat dat rotondes met schuine aansluitingen een grotere capaciteit hebben dan rotondes met een rechte aansluiting. Dit onder andere omdat bij een rechte aansluiting meer sprake is van een haakse T-aansluiting waar de snelheid lager ligt dan op schuinere aansluitingen. Ook is er bij een schuine aansluiting sprake van meer “weefgedrag” dan bij een rechte aansluiting. Bij de rechte aansluiting is de toerit dan ook meer te zien als een zijweg dan bij een schuine aansluiting. Het is echter onduidelijk of rotondes met schuine aansluitingen veiliger zijn. Het zou veiliger kunnen zijn omdat de aanrijdende automobilisten door hun zijraam de op de rotonde rijdende auto's beter kunnen zien dan bij een rotonde met rechte aansluitingen. Dat komt doordat het in het rechte geval goed mogelijk is dat de spijl tussen voor- en zijraam het zicht belemmert. Het zou echter ook kunnen dat andere voertuigen juist in de dode hoek komen waardoor de aansluiting weer onveiliger wordt. Verder kan gelden dat door de hogere snelheid op de schuinere rotondes de onveiligheid juist weer toeneemt.

Binnen Witteveen+Bos zijn er verschillende mensen die vinden dat op rotondes in Nederland de balans tussen de veiligheid en de capaciteit teveel is doorgeslagen naar de veiligheidskant. Tevens wordt erop gewezen dat het nog maar de vraag is of een toename van de capaciteit ook per definitie leidt tot onveiligere situaties. Dit is onder andere terug te vinden in artikelen die in de bladen “Wegen” en “Transport en Logistiek” zijn gepubliceerd (Bekkernens & Boender, 2004 & Bekkernens, 2005). Het belangrijkste voorstel is om het oprijden van de rotonde te vergemakkelijken door de aansluitbogen¹ te vergroten. De concrete effecten van zo'n aanpassing voor de capaciteit en de verkeersveiligheid zijn echter nog niet helder. Dit onderzoek richt zich er dan ook op om te onderbouwen wat kan worden verwacht van een dergelijke aanpassing.

1.2. Doelstelling

De doelstelling van het stageonderzoek luidt:

Het bepalen van de effecten van schuinere aansluitingen op de capaciteit en de verkeersveiligheid van rotondes.

Door uitvoerig literatuuronderzoek, het gebruik van bestaande modellen, een taak- en zichtanalyse en metingen op bestaande rotondes wordt geprobeerd aan deze doelstelling te voldoen.

1.3. Onderzoeksvragen

Om aan de doelstelling te kunnen voldoen moeten de volgende hoofd-onderzoeksvragen worden beantwoord:

- Wat is het capaciteitsverschil tussen rotondes met schuine aansluitingen en rotondes met rechte aansluitingen?
- In hoeverre is één van de twee soorten rotondes (verkeers-)veiliger?

¹ Deze en andere specifieke termen worden behandeld in het hoofdstuk “Definities” (2). Ook in de “Gebruikte Termen” aan het einde van dit verslag is een aantal termen uitgelegd.

Om nog wat duidelijker te krijgen wat er precies gedaan moet worden zijn deelvragen opgesteld. Deze zijn concreter dan de hoofdvragen en met de beantwoording van de deelvragen kunnen de twee hoofdvragen beantwoord worden. De deelvragen zijn:

- 1) Van welke rotondes zijn gegevens te vergaren? Het gaat hierbij om gegevens over:
 - a) Maten rotonde (binnendiameter, buitendiameter, enz.)
 - b) Intensiteiten
 - c) Aantal ongevallen
 - d) Slachtoffers (lichtgewonden, zwaargewonden en doden)
- 2) Welke rotondes kunnen met elkaar worden vergeleken?
- 3) Wat is de capaciteit van de rotondes? (berekenen/bepalen)
- 4) Wat is verkeersveiligheid en hoe is dat te meten?
- 5) Hoe is het gesteld met de verkeersveiligheid op de rotondes?
- 6) Zijn de gevonden capaciteit en verkeersveiligheid representatief genoeg?
- 7) In hoeverre kloppen bestaande snelheidsformules voor rotondes?

1.4. Relevantie van het onderzoek

Dit onderzoek kan mogelijk een significant verschil aantonen in capaciteit en verkeersveiligheid van rotondes met schuinere dan wel rechtere aansluitingen. De uitkomsten kunnen worden gebruikt om nog eens te heroverwegen of op rotondes in Nederland de juiste afwegingen zijn gemaakt tussen vormgeving en capaciteit en veiligheid. Het kan bijvoorbeeld zo zijn dat, bij drukke rotondes, beter gekozen zou kunnen worden voor schuinere aansluitingen. Dit zou de knelpunten zoals die nu bestaan bij veel van die rotondes kunnen doen verminderen. Ook kan het echter zo zijn dat er weinig capaciteitswinst wordt behaald met schuinere aansluitingen en dat de verkeersveiligheid behoorlijk achteruit gaat. Duidelijkheid over de effecten van aansluitingen op de capaciteit en de verkeersveiligheid zijn dus de belangrijkste uitkomsten van dit onderzoek.

1.5. Afbakening

Om uiteindelijk een duidelijke uitkomst te kunnen verkrijgen is het van belang vooraf af te bakenen wat er behandeld gaat worden in het onderzoek. Hiervoor zijn uitgangspunten opgesteld.

Uitgangspunten:

- Dit onderzoek richt zich alleen op enkelstrooks rotondes. Dit omdat de rotondes in Nederland bijna allemaal van deze vorm zijn.
- Voor de capaciteit wordt de invloed van fietsers niet meegenomen, voor de verkeersveiligheid juist wel. Dit is gedaan omdat bij de capaciteit de fietsers dezelfde invloed zullen hebben op de verschillende soorten rotondes, terwijl er qua verkeersveiligheid juist verschillen kunnen zijn voor fietsers wanneer rotondes anders zijn aangesloten.
- Alleen het verschil in aansluiting wordt bekeken. Er wordt derhalve vanuit gegaan dat de andere rotonde-elementen gelijke afmetingen hebben op de verschillende rotondes.

1.6. Leeswijzer

Om de effecten van schuinere aansluitingen helder te krijgen worden een aantal deelaspecten behandeld. Voor de duidelijkheid zullen eerst de verschillende onderdelen op de rotonde en de capaciteit en verkeersveiligheid worden gedefinieerd (hoofdstuk 2). Ook de variabelen die van invloed zijn op verkeersveiligheid en capaciteit worden besproken (3). Vervolgens worden de twee rotondes besproken die vergeleken zijn (4). Hierna zal worden ingegaan op een belangrijke component van zowel capaciteit als verkeersveiligheid, namelijk de snelheid (5). Vervolgens worden de capaciteit (6) en de verkeersveiligheid (7) uitvoerig behandeld. Uiteindelijk zal in de conclusie (8) worden aangegeven wat de uitkomsten van het onderzoek zijn en zal die conclusie kritisch worden bekeken (9).

2. DEFINITIES

Voordat er daadwerkelijk kan worden gekeken naar de verschillen tussen rotondes met schuine aansluitingen en rotondes met rechte aansluitingen moeten een aantal begrippen duidelijk worden gedefinieerd. Wat is bijvoorbeeld veiligheid en hoe wordt de capaciteit van een rotonde berekend. In dit hoofdstuk zullen (onder andere) deze begrippen aan de orde komen. Ook wordt er ingegaan op de verschillende onderdelen van een rotonde.

2.1. Capaciteit

De capaciteit wordt gewoonlijk gebruikt om te bepalen wat de prestatie van een bepaald voorwerp of een bepaalde verschijning is. Zo wordt bijvoorbeeld als iemand een bepaalde handeling goed kan uitvoeren dat een capaciteit van hem genoemd. In de wereld van verkeer en vervoer wordt met capaciteit over het algemeen bedoeld hoeveel motorvoertuigen of personenauto-equivalenten (pae) in een bepaalde tijdseenheid een bepaald wegvak kunnen passeren. Op een kruispunt, een rotonde is immers een bijzondere variant van een kruispunt, is echter de vraag wat nu precies kan worden aangemerkt als capaciteit. Is dit bijvoorbeeld het maximale aantal voertuigen dat per tijdseenheid het kruispunt kan passeren of gaat het alleen om één richting?

Bij rotondes wordt in Nederland gerekend met de capaciteit van de toe- en afritten (Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek [CROW] publicatie 126, 1998). Dat wil dus zeggen dat het maximale aantal voertuigen dat de rotonde kan betreden of verlaten de maat is voor de capaciteit van de rotonde. Omdat niet alle voertuigen een gelijk deel van een rotonde innemen wordt niet gerekend met motorvoertuigen maar met personenauto-equivalent (pae). Dat wil zeggen dat bijvoorbeeld vrachtwagens en bussen (eventueel ook fietsers) worden omgerekend naar personenauto's. Zo telt over het algemeen een vrachtauto voor minimaal twee personenauto's en een fiets 0,3 personenauto (CROW, 2004). Verder is het gebruikelijk om bij de capaciteit te spreken in uren. De eenheid van de capaciteit wordt dan ook pae per uur (verder: pae/uur).

Over het algemeen komen de meeste problemen voor op de toerit van de rotonde. Daar komt immers de stroom die de rotonde oprijdt samen met de stroom die al op de rotonde rijdt. Aangezien de voertuigen die de rotonde naderen voorrang moeten verlenen aan voertuigen die op de rotonde rijden komen hier capaciteitsproblemen aan het licht. Daar komt nog bij dat er vaak ook sprake is van een schijnconflict met het verkeer dat van de afrit van dezelfde tak als de toerit gebruik maakt (afritverkeer). Het schijnconflict houdt in dat voertuigen de rotonde niet oprijden omdat bijvoorbeeld het afslaande voertuig geen richting aangeeft. Ook late detectie van afslaande voertuigen kan leiden tot het niet gebruik maken van een beschikbaar hiaat. De afrit vormt alleen eventueel problemen als er sprake is van een rotonde met fietsers in de voorrang. Wanneer van twee naar één rijstrook samengevoegd moet worden door auto's kan er ook een probleem ontstaan op de afrit, dit is echter niet van toepassing op dit onderzoek omdat het alleen over enkelstrooksrotondes gaat. Omdat bij de toerit ook aan andere motorvoertuigen voorrang moet worden gegeven is de toerit over het algemeen maatgevend voor de capaciteit. Er zal dan ook naar de toerit worden gekeken.

Onder capaciteit wordt in dit onderzoek dus verstaan het totale aantal pae dat per uur over een toerit kan rijden. Dit is uiteraard afhankelijk van het aantal voertuigen op de rotonde. Deze afhankelijkheid komt later aan de orde. Overigens is het gebruikelijk dat de capaciteit van de verschillende toeritten van dezelfde rotonde op een bepaald moment anders is omdat er sprake is van andere hoeveelheden rotondeverkeer. De rotondecapaciteit is de capaciteit van de verschillende toeritten bij elkaar opgeteld. Deze is groter naarmate er relatief gezien meer rechtsafslaand verkeer is (De Leeuw, Tutert & Willems, 1999).

Het is van belang op te merken dat in dit onderzoek capaciteit op twee manieren wordt gebruikt. Zo is er de capaciteit ten gevolge van het rotonde- en afritverkeer en de afrijcapaciteit. De eerste is hierboven al beschreven. De afrijcapaciteit van de toerit is de capaciteit die een toerit heeft wanneer er geen rotonde- en afritverkeer aanwezig is op de rotonde. Hierdoor kan het toe-

ritverkeer ongestoord de rotonde oprijden. De capaciteit van de toerit is in dat geval dus maximaal.

2.2. Verkeersveiligheid

Aangezien wordt onderzocht of er verschillen zijn in veiligheid tussen de rotondetypen zal eerst bekend moeten zijn wat onder verkeersveiligheid wordt verstaan. Tevens moet worden bekeken hoe die veiligheid gemeten kan worden.

Veiligheid wordt door Weijermars (2001) gedefinieerd als: Het veilig zijn in het verkeer. De mate van veiligheid houdt verband met de kans die wordt gelopen op een ongeval en de mogelijke gevolgen daarvan. Een verkeersongeval wordt internationaal gedefinieerd als: een gebeurtenis op de openbare weg, die verband houdt met het verkeer, waarbij minstens één rijdend voertuig is betrokken en ten gevolge waarvan één of meer weggebruikers zijn overleden of gewond zijn geraakt (Weijermars, 2001).

Er zijn verschillende soorten ongevallen zowel qua betrokkenen als qua ernst van het letsel. Zo zijn er ongevallen tussen snel verkeer onderling, en tussen snel en langzaam verkeer. Ook zijn er ongevallen met en zonder letsel en/of doden.

Weijermars (2001) kiest ervoor om enkel de ongevallen waarbij minimaal sprake is van letsel mee te nemen in haar onderzoek. Dat wil dus zeggen dat ongevallen waarbij alleen materiële schade is niet worden meegenomen. Dit lijkt een goede maat omdat veel ongevallen waarbij alleen materiële schade is niet worden gemeld bij de politie, ondanks dat dit wel wettelijk verplicht is. Bovendien hebben ongelukken met letsel meer impact, waardoor letselongevallen (en erger) belangrijker zijn dan niet-letselongevallen.

Een andere manier om de verkeersveiligheid te bepalen is aan de hand van bestaande literatuur. Dit kan worden gebruikt als het verkrijgen van ongevaldata niet mogelijk is.

2.3. De elementen van een rotonde

Het is van belang helder te krijgen wat precies de verschillende elementen van een rotonde zijn. Zo is in het vervolg duidelijk wat met specifieke vaktermen bedoeld wordt. Aan de hand van figuur 2.1 op de volgende pagina zullen de verschillende onderdelen worden besproken.

2.3.1. Toerit

De toerit is het wegvak waarover de voertuigen rijden die de rotonde naderen. De voertuigen die over dit wegvak rijden zullen in principe allemaal over de rotonde hun weg vervolgen. Belangrijke gegevens van de toerit zijn onder andere de breedte en de hoek die de toerit maakt met de rijbaan van de rotonde.

2.3.2. Afrit

De afrit is het wegvak dat na de rotonde wordt bereden. Hierbij zijn dezelfde gegevens van belang als bij de toerit.

2.3.3. Conflictpunt

Het conflictpunt van een rotonde is het punt waarop voertuigen die de rotonde oprijden de op de rotonde rijdende voertuigen tegen kunnen komen. Dat wil dus zeggen dat het punt waarop beide wegen elkaar snijden/raken het conflictpunt is.

2.3.4. Aansluitboog

De aansluitboog wordt gedefinieerd als de straal van de cirkel waarmee de zijweg aansluit op de rotonde. Als er dus sprake is van een kleine aansluitboog dan is er sprake van een relatief scherpe en rechte aansluiting. Zowel de toe- als de afrit hebben een aansluitboog. Hierbij geldt dat in de regel de aansluitboog van de afrit groter is dan die van de toerit. Dat wil dan ook zeggen dat de snelheid bij het uitkomen van de rotonde over het algemeen hoger ligt dan bij het ingaan van de rotonde.

2.3.5. Binnenstraal

De binnenstraal van een rotonde is de straal van de cirkel die het middeneiland omschrijft. De binnenstraal bepaalt, samen met de buitenstraal, een belangrijk deel van de maximaal mogelijke snelheid op de rotonde zelf. Daarbij geldt dat een grotere straal een grotere snelheid mogelijk maakt.

2.3.6. Buitenstraal

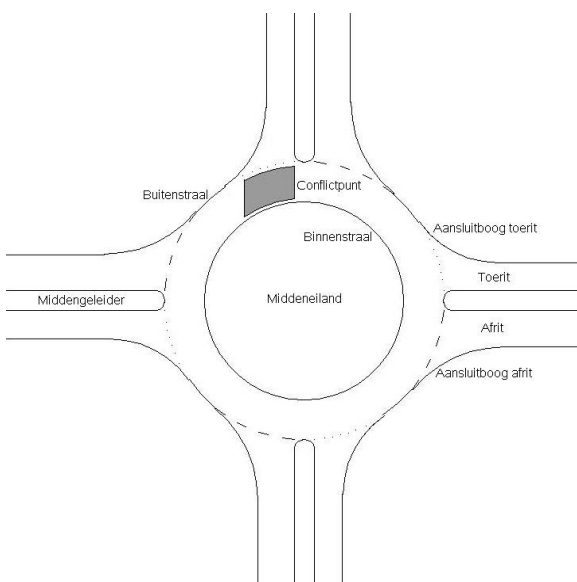
De buitenstraal van een rotonde is de straal van de cirkel van de buitenkant van de rijbaan. Bij de meeste Nederlandse rotondes is de buitenstraal ongeveer 5,25 a 5,50 meter groter dan de binnenstraal. Het verschil tussen binnenstraal en buitenstraal is de rijbaanbreedte.

2.3.7. Middeneiland

Het middeneiland is het gedeelte van de rotonde waaromheen gereden wordt. Soms kent het middeneiland een overrijdbaar deel om grote voertuigen gemakkelijker te laten passeren (Rammelstrook). Dit wordt aangelegd omdat vrachtwagens en bussen vaak moeite hebben de rijbaan te volgen vanwege de krappe dimensionering.

2.3.8. Middengeleider

De middengeleider scheidt de toerit van de afrit. Er gelden aanbevelingen voor minimumbreedten voor middengeleiders omdat er fietsers moeten kunnen stoppen. Er wordt daarbij een onderscheid gemaakt of fietsers wel of niet in de voorrang gezet zijn.



Figuur 2-1 Benaming van rotondeonderdelen

3. VARIABELEN

Hier worden variabelen besproken die van invloed zijn op de capaciteit en de verkeersveiligheid van rotondes.

3.1. Capaciteit

De capaciteit van een rotonde wordt zoals eerder al beschreven bepaald aan de hand van de capaciteit van de toerit. Daarbij is van belang hoeveel voertuigen het conflictpunt kunnen passeren in een uur.

3.1.1. Snelheid

De snelheid waarmee het conflictpunt kan worden bereden is een belangrijke variabele voor het bepalen van de capaciteit van de toerit. Bij een hogere snelheid kunnen er meer voertuigen per uur over het conflictvlak. Er moet dan echter wel sprake zijn van een ongeveer gelijkblijvende voertuigvolgafstand. Bij een snelheid van 10 m/s (36 km/uur) is bij een voertuigvolgtijd van 2,4 seconden de afstand tussen voertuigen 24 meter. Is de snelheid echter 5 m/s dan wordt de voertuigvolgtijd 4,8 seconden waardoor de capaciteit, theoretisch, 50% lager moet liggen. Bij lagere snelheden wordt de voertuigvolgafstand echter korter omdat de volgtijd vaak ongeveer gelijk blijft. De voertuigvolgafstand is dus afhankelijk van de snelheid.

De capaciteit hangt als volgt af van de snelheid:

$$C_T = \frac{v}{s_{volg}} \cdot 3600 = \frac{3600}{t_{volg}} \quad (3.1)$$

Hierbij is:

- C_T = Capaciteit van de toerit [pae/uur]
- v = Gemiddelde snelheid bij passeren conflictvlak [m/s]
- s_{volg} = Voertuigvolgafstand [m]
- t_{volg} = Voertuigvolgtijd [s]

De afrijcapaciteit is direct te berekenen met formule 3.1, dit omdat in dat geval geen last wordt ondervonden van overige voertuigen. De afrijcapaciteit van een rotonde is dus voornamelijk afhankelijk van de voertuigvolgtijd, die afhankelijk is van de snelheid en de voertuigvolgafstand.

De snelheid hangt grotendeels af van de vormgeving van de rotonde. Als de rotonde bijvoorbeeld krap is opgezet dan zal de snelheid op de rotonde vrij laag liggen. Hetzelfde geldt voor een rotonde met een haakse (rechte) aansluiting. In feite kan worden gezegd dat de grootste capaciteit wordt bereikt als er sprake is van een rotonde met brede rijstroken waarop bijna rechtdoor gereden kan worden. Voor de verkeersveiligheid is dit echter sterk af te raden.

3.1.2. Intensiteit rotondeverkeer

De snelheid is echter niet de enige variabele waar de capaciteit van een toerit van afhangt. De intensiteit van het rotondeverkeer is ook van belang. Dit komt voornamelijk doordat de voertuigen op de rotonde voorrang hebben op voertuigen op de toerit. Op een rotonde waarbij fietsers in de voorrang zitten vermindert de fietsintensiteit ook de capaciteit van de toerit. In dat geval moeten de fietsers worden omgerekend naar pae's. Volgens Leijts (2003) vormen fietsers op drukke rotondes bijna geen capaciteitsbelemmering terwijl ze op verder lege rotondes evenveel capaciteitsvermindering veroorzaken als een personenauto. De pae-waarde van fietsers is bij hem dus afhankelijk van de intensiteit van het rotondeverkeer en varieert van 0 tot 1 pae.

Als ervan wordt uitgegaan dat de capaciteit van een conflictpunt constant is dan zou elke pae die over de rotonde rijdt ter hoogte van de toerit de capaciteit van de toerit met één pae

moeten verlagen. Bovy (1991) heeft echter empirisch gevonden dat elke pae op de rotonde leidt tot een capaciteitsverlies van 8/9 pae voor de toerit.

De capaciteit hangt als volgt af van de intensiteit van het rotondeverkeer:

$$C_T = C_0 - \alpha \cdot I_R \quad (3.2)$$

Hierbij is:

C_0 = Afrijcapaciteit [pae/uur]

α = Factor voor invloed rotondeverkeer [-] (bij Bovy 8/9)

I_R = Intensiteit rotondeverkeer [pae/uur]

Er zijn echter ook onderzoekers die geen lineair, maar een exponentieel verband hebben gevonden tussen de intensiteit van het rotondeverkeer en de capaciteit van de toerit. Enkelen daarvan zijn Brilon, Tanner en Troutbeck (Van Beinum, 2007). In dat geval heeft dezelfde absolute toename van het aantal voertuigen/pae op een rustige rotonde meer invloed dan op een drukke rotonde.

3.1.3. Afslaand Verkeer

Ook de hoeveelheid afslaand verkeer heeft invloed op de capaciteit van de toerit. Het gaat dan om het verkeer dat afslaat op de afrit die op dezelfde tak als de toerit ligt. Er is dan ook sprake van een schijnconflict omdat de voertuigen niet echt over het conflictvlak rijden maar wel de capaciteit verminderen. De capaciteit wordt onder andere verminderd doordat sommige bestuurders die af gaan geen richting aangeven waardoor bestuurders die de rotonde op willen rijden geen gebruik maken van een hiaat dat ze eigenlijk wel hadden kunnen gebruiken.

De meeste formules die bekend zijn tellen het afslaande verkeer vermenigvuldigd met een bepaalde factor op bij de intensiteit van het rotondeverkeer. Die factor is weer afhankelijk van de vormgeving van de rotonde. Zo heeft bijvoorbeeld een grotere afstand tussen af- en toerit tot gevolg dat de invloed van het rechtsafslaande verkeer kleiner wordt. De variabelen zijn: Binnen- en buitenstraal rotonde, stralen aansluitingen, breedte rijbanen en middengeleider.

3.1.4. Bestuurders

Ook de bestuurders hebben invloed op de capaciteit van een toerit. Dit heeft er vooral mee te maken dat voor bestuurders verschillende, zogenaamde, kritische hiaten bestaan. Zo is het bijvoorbeeld goed mogelijk dat een qua intensiteit en vormgeving identieke rotonde in een grote stad een grotere toeritcapaciteit heeft dan in een klein dorp op het platteland. Dit omdat het leven vaak wat minder gehaast is op het platteland dan in de stad. Hierdoor zullen "stadse" bestuurders eerder een hiaat acceptabel vinden om op de rotonde te rijden dan "plattelanders".

3.1.5. Overzicht

Het overzicht op een rotonde kan ervoor zorgen dat bestuurders eerder weten wanneer ze de rotonde kunnen oprijden. Zo kan het bijvoorbeeld zijn dat als kan worden opgemerkt dat van de overige richtingen geen verkeer komt er goed de rotonde opgereden kan worden. Dit geldt vooral voor vrachtwagens en bussen omdat die een groter hiaat nodig hebben om de rotonde op te kunnen rijden. Andersom geredeneerd geldt dus ook dat een slecht overzicht de capaciteit kan doen verminderen.

3.2. Verkeersveiligheid

Ook de veiligheid wordt door een aantal variabelen bepaald. Hieronder zullen deze besproken worden. Een belangrijk uitgangspunt is het bewegende deeltjesmodel. Dat model gaat over de kans op een botsing tussen twee deeltjes, meestal moleculen. Het model stelt dat kans op een botsing toeneemt bij een hogere temperatuur (hierdoor versnelt de beweging van de deeltjes),

een grotere dichtheid van een stof en een groter contactoppervlak. Tevens neemt de kans op een geslaagde botsing toe bij hogere snelheden. Een succesvolle botsing is in dat geval het plaatsvinden van een reactie. Aangezien een deel van de verkeersonveiligheid wordt veroorzaakt door botsingen is kan dit een goede manier zijn om naar verkeersveiligheid te kijken.

3.2.1. Snelheid

Net zoals de capaciteit hangt ook de verkeersveiligheid af van de snelheid van de voertuigen op de rotonde. Als de snelheid van het zogenaamde snelle verkeer, dat zijn over het algemeen de motorvoertuigen, hoog ligt is de kans op een ongeval groter. Tevens is in dat geval de kans dat dat ongeval ernstig is groter. Dit werkt dus dubbel mee als er gekozen wordt om de ernst van de ongelukken mee te nemen bij het bepalen van de verkeersveiligheid. De gevolgen van een hoge snelheid komen dus overeen met die van de temperatuurstijging in het botsende deeltjes model. De grootste veiligheid kan worden bereikt op een krappe rotonde met haakse aansluitingen waar de snelheid laag zal liggen.

3.2.2. Intensiteiten verkeer

Ook de intensiteit van het verkeer is van invloed op de veiligheid. Dat wil zeggen dat wanneer er meer voertuigen gebruik maken van een rotonde de kans dat tegen één van die voertuigen gebotst wordt groter wordt. Ook neemt de kans op ongevallen toe wanneer er grotere hoeveelheden fietsers van de rotonde gebruik maken. Met andere woorden: omdat de dichtheid van het aantal voertuigen toeneemt groeit ook de kans op een ongeval/botsing.

3.2.3. Rijgedrag

Uiteraard heeft het rijgedrag van bestuurders ook invloed op de verkeersveiligheid. Agressief rijgedrag kan tot ongelukken leiden. Echter kan weifelend rijden ook tot onduidelijkheid leiden waardoor alsnog ongelukken kunnen plaatsvinden. De vraag is dus of er een duidelijk verband is tussen het rijgedrag en de verkeersveiligheid. Wat wel tot extra onveiligheid kan leiden is de mate waarin wordt verzuimd om de richtingaanwijzer uit te steken bij het verlaten van de rotonde. Dit heeft vooral een ongunstig effect op de verkeersveiligheid als fietsers uit de voorrang gezet zijn en er onverwacht een voertuig afslaat zonder richting aan te geven.

Bumperkleven en onverwachts remmen kan juist tot meer kop-staartongevallen leiden.

3.2.4. Voorrangsregeling

De voorrangsregeling op een rotonde is eveneens van belang voor de verkeersveiligheid. Zo heeft Weijermars (2001) aangetoond dat er op een rotonde met fietsers in de voorrang drie keer zoveel letselongevallen plaatsvinden als op rotondes met fietsers uit de voorrang. Dit komt voornamelijk doordat bestuurders geen voorrang verlenen aan fietsers terwijl ze dat wel zouden moeten doen (bij fietsers in de voorrang).

3.2.5. Zicht

Voor de verkeersveiligheid is het ook van belang hoe goed het zicht is. Is het bijvoorbeeld zo dat fietsers in de dode hoek of achter de spijl naast de voorruit zitten dan beïnvloedt dat de verkeersveiligheid negatief. Ook wanneer motorvoertuigen in de dode hoek of de spijl naast de voorruit zitten kan er een onveilige situatie ontstaan. Het gaat hier dus om voertuigen die van de rijbaan van de rotonde gebruik maken.

De eenzijdige ongevallen vinden ook vaak plaats door gebrek aan zicht. Bijvoorbeeld als een rotonde te laat wordt gezien kan ergens tegen het middeneiland worden gebotst (vooral 's nachts). Door de eenzijdige ongevallen is het botsende deeltjes model overigens niet relevant aangezien er maar één "deeltje" (een voertuig) is.

4. ROTONDES

Voor de vergelijking van capaciteit en verkeersveiligheid zijn twee rotondes bezocht. Tevens worden deze rotondes gebruikt om met behulp van modellen naar de verschillen te kijken. In dit hoofdstuk worden de twee rotondes besproken die vergeleken zijn in de rest van het onderzoek. De rotondes liggen in de gemeenten Enschede en Zeewolde en zullen in het vervolg van dit verslag dan ook worden aangeduid met de gemeentenaam.

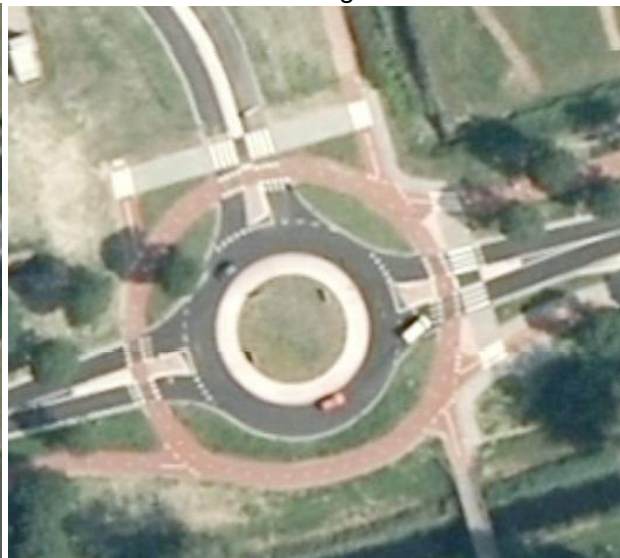
4.1. Enschede

Op de kruising tussen de Haaksbergerstraat en de Ferdinand Bolstraat-Helmerzijdeweg in Enschede ligt een rotonde (figuur 4.1). De rotonde ligt op de doorgaande weg richting Haaksbergen en wordt dan ook voornamelijk belast in de rechtdoorgaande richting van de Haaksbergerstraat, een afrijcapaciteitsmeting is dan ook goed mogelijk. De Helmerzijdeweg is het verlengde van een vrijliggend fietspad dat de wijk Helmerhoek (bijna 8.500 inwoners²) ontsluit. Hierdoor is het aantal fietsers op de rotonde vrij groot. Er is geen rotonde met nog rechttere aansluitingen gekozen omdat grote voertuigen dan te veel moeite hebben met het berijden van de rotonde (CROW, 1998).

De rotonde wordt gekenmerkt door vrij rechte aansluitingen. De straal van de aansluitboog van de toeritten is in dit geval 12 meter. Op de rotonde ligt een vrijliggend en enkelstrooks fietspad dat op een behoorlijke afstand van de rijbaan voor auto's ligt. Hierdoor kan er een klein voertuig tussen de fietsstrook en de rotonde zelf stilstaan. Op het middeneiland, dat al vrij hoog is, staat een groot kunstwerk. Hierdoor is de overkant van de rotonde lastig te zien.



Figuur 4.1 Enschede, bron: Live Maps



Figuur 4.2 Zeewolde, bron: Live Maps

4.2. Zeewolde

Sinds enkele jaren ligt op de kruising Gelderseweg-Kwartiermakerslaan in Zeewolde een rotonde die wat anders is dan in de rest van Nederland (figuur 4.2). De diameter van de rotonde is klein, maar de aansluitingen zijn schuiner dan anders. De rotonde ligt op de weg van het centrum van Zeewolde en een bedrijventerrein richting Harderwijk. Over de rotonde rijden weinig voertuigen.

De aansluitbogen van de toeritten hebben een straal van 15 meter. Dit maakt de rotonde dus schuiner dan die in Enschede. De middengeleider wordt dicht bij de rotonde breder. Hierdoor worden voertuigen meer schuin de rotonde opgeleid. Op de rotonde ligt een tweestrooks en vrijliggend fietspad waar maar weinig fietsers gebruik van maken. De diameter van deze rotonde is wat groter dan die in Enschede (31,5 om 34 meter). In tegenstelling tot Enschede staat er op het middeneiland geen kunstwerk en is ook het middeneiland ook vrij laag.

Een aantal honderden meters verderop ligt een vergelijkbare rotonde.

² <http://nl.wikipedia.org/wiki/Helmerhoek>

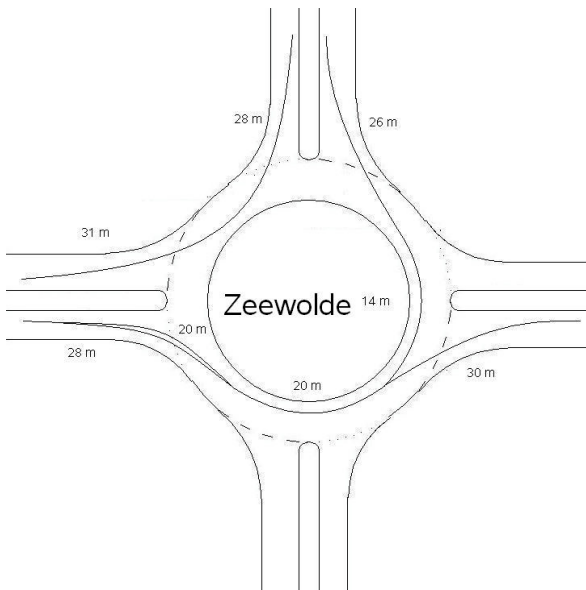
5. SNELHEID

Zoals eerder al aangegeven is de snelheid die op een rotonde gereden kan worden een belangrijke variabele is voor de capaciteit en de verkeersveiligheid van die rotonde. In dit hoofdstuk wordt eerst besproken waarom de Nederlandse formule gebruikt wordt voor het bepalen van de snelheid op de verschillende rotondes. Vervolgens zullen die snelheden worden berekend.

5.1. Vergelijking formules met werkelijkheid

Tijdens de meting in Zeewolde zijn snelheidsmetingen op de rotonde uitgevoerd. Deze metingen hielden in dat met een kleine personenauto (VW Polo) enkele keren over de rotonde werd gereden met zo hoog mogelijke snelheden. Uiteindelijk worden de hoogste snelheden gebruikt voor het verdere onderzoek. Opgemerkt dient te worden dat de gemeten snelheden slechts ruwe schattingen zijn. Zo is bijvoorbeeld bekend dat over het algemeen de snelheidsmeter van auto's te veel aangeven. Ook is het schatten wat de wijzer precies aangeeft. Het feit dat de metingen niet geheel volgens een bepaalde formule lopen (zie figuur hieronder) ligt dan ook hieraan.

De gegevens zijn vervolgens vergeleken met twee formules die bekend zijn over snelheid op rotondes. Daarvoor zijn met behulp van de originele ontwerptekeningen de verschillende boogstralen die maximaal worden bereden bepaald. Maximaal wil zeggen dat wordt uitgegaan van het meest negatieve geval, waarbij de boogstralen dus maximaal zijn en de snelheid het hoogst. De geschatte boogstralen zijn in figuur 5.1 weergegeven. De boogstralen van deze rotonde waren reeds bekend doordat voor het ontwerp de snelheid op de rotonde al was bekeken. Het ontwerp is van de Hand van Witteveen+Bos en de ontwerptekeningen zijn daar dan ook aanwezig.



Figuur 5.1 Boogstralen op de rotonde in Zeewolde

Er zijn twee formules bekeken. De ene is afkomstig van de publicatie “Eenheid in Rotondes” (CROW publicatie 126, 1998) van het CROW. Dit is het Nederlandse kennisplatform voor infrastructuur, verkeer, vervoer en openbare ruimte. De andere formule is afkomstig van de Federal Highway Administration (FHWA), de Amerikaanse wegbeheerder (Robinson, 2000). Qua vorm verschillen de twee formules niet heel erg, maar de uitkomsten van beide formules wijken behoorlijk af.

De formules:

CROW: $V = 7,4 \cdot \sqrt{R}$

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

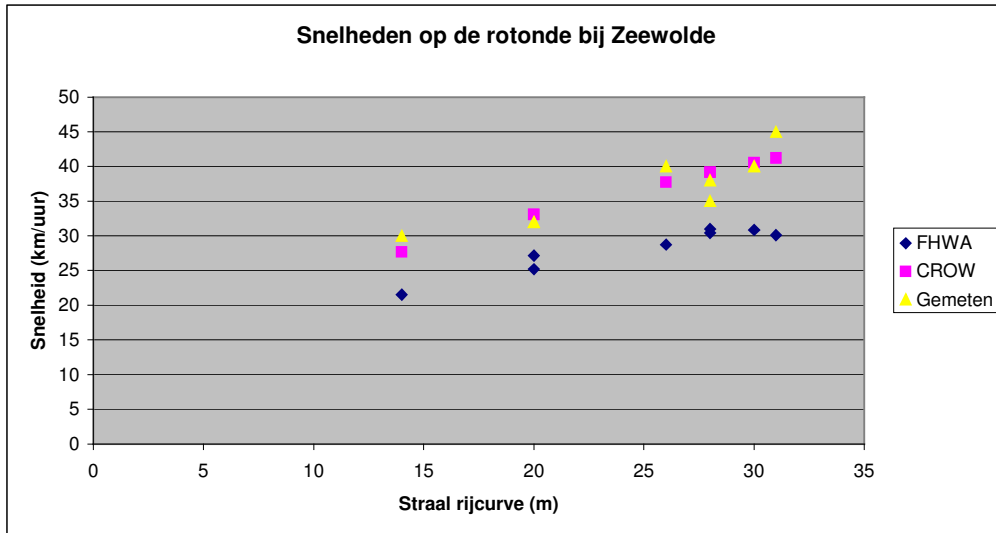
Daarbij is:

V = Snelheid [km/uur]

R = Straal van de rijcurve [meter]

e = Alignment in breedterichting [m/m]

f = Frictiefactor [-]



Figuur 5.2 Snelheidsformules vergeleken met de meting

In figuur 5.2 zijn de uitkomsten van de formules en de gemeten waarden weergegeven. Op de x-as staat de straal van de rijcurve. Op de y-as staat de bijbehorende snelheid van zowel de twee formules als de gemeten snelheden. Het kan zijn dat er bij dezelfde boogstraal twee snelheden gemeten zijn. Die worden dan ook boven elkaar weergegeven (zie bijvoorbeeld de straal van 28 meter met snelheden van zowel 35 als 38 km/uur). Ook is het mogelijk dat er met de FHWA-formule bij eenzelfde straal verschillende snelheden berekend worden. Dit heeft ermee te maken dat het alignment in de breedterichting het nemen van de bocht gemakkelijker maakt (wanneer de bocht naar buiten toe oploopt) of juist bemoeilijkt (wanneer het wegdek naar de binnenkant van de bocht oploopt). Het meewerken is in dit geval te vergelijken met een wielervederbaan die oploopt naar buiten. Als die wielervederbaan naar de binnenkant toe op zou lopen dan zou de bocht bijna onneembaar zijn vanwege de middelpuntzoekende kracht.

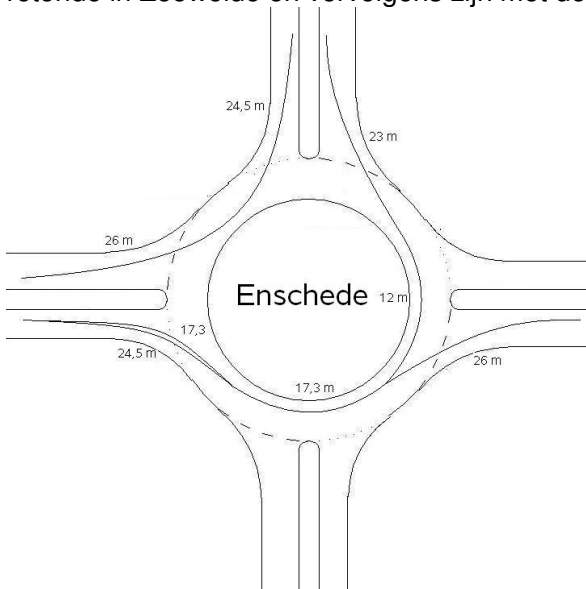
Duidelijk wordt dat de CROW-formule de snelheid een stuk hoger inschat dan de FHWA-formule. Ook is te zien dat de CROW-formule veel dichterbij de werkelijk gereden snelheden ligt dan de Amerikaanse formule. Een mogelijke reden daarvoor is dat de FHWA uitgaat van een ontwerpsnelheid en dat die snelheid meer een gemiddelde snelheid is dan een maximale. Een andere reden kan zijn dat er over het algemeen grotere rotondes zijn in de VS waardoor de formule beter klopt voor grotere rotondes met grotere boogstralen. Daardoor zou de formule bij de over het algemeen kleine rotondes zoals die in Nederland (en ook in Zeewolde) liggen minder kloppend kunnen zijn. Ook kan het zo zijn dat er in de VS anders wordt gereden dan in Nederland. Zo kan het zijn dat de auto's in de VS gemiddeld genomen groter zijn dan in Nederland. Het is goed mogelijk dat het berijden van een rotonde met een grotere auto lastiger is en dat daardoor de snelheid op de rotonde gemiddeld lager ligt. Ook de doorgaans slappe vering van Amerikaanse auto's maakt het maken van bochten, en dus ook het berijden van rotondes, moeilijker. Over de meting dient overigens nog gezegd te worden dat die niet erg nauwkeurig is. Er is slechts tijdens het rijden gekeken naar snelheden die werden aangegeven door de kilometerteller. Deze tellers zijn over het algemeen niet al te nauwkeurig en het kan dan ook zijn dat door een afwijking de werkelijke snelheid lager ligt dan de kilometerteller aangeeft. Dit is nog een reden waarom de formules naast de gemeten snelheden kan zitten. Voor de Amerikaanse formule is dit effect duidelijker zichtbaar omdat toch al een lage waarde wordt aangegeven.

Het lijkt dus zo te zijn dat de CROW formule het best gebruikt kan worden om maximale snelheden op rotondes te bepalen.

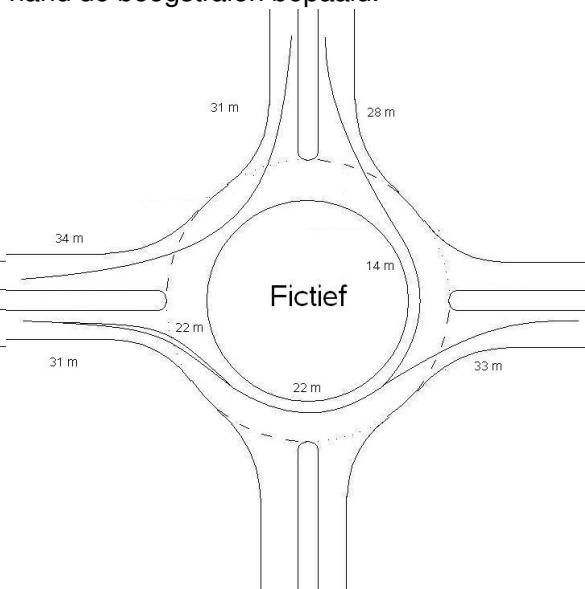
5.2. Berekening snelheden

Het is nu van belang voor de verschillende rotondes verschillende snelheden te berekenen. Daarvoor echter wordt nog een nieuwe rotonde geïntroduceerd. Het gaat om een fictieve rotonde met aansluitbogen van de toerit met een straal van 18 meter. Dit is om te kijken wat een nog grotere aansluitboog voor een gevolgen heeft op capaciteit en verkeersveiligheid. Dit is dus een rotonde met nog schuinere aansluitingen.

De boogstralen van de Enschedese rotonde (figuur 5.3) zijn bepaald met behulp van het programma AutoCAD. Dit kon doordat door de gemeenten Enschede een tekening heeft aangeleverd van de rotonde waar gemeten is. Voor de fictieve rotonde (figuur 5.4) is uitgegaan van de rotonde in Zeewolde en vervolgens zijn met de hand de boogstralen bepaald.



Figuur 5.3 Boogstralen op de rotonde in Enschede



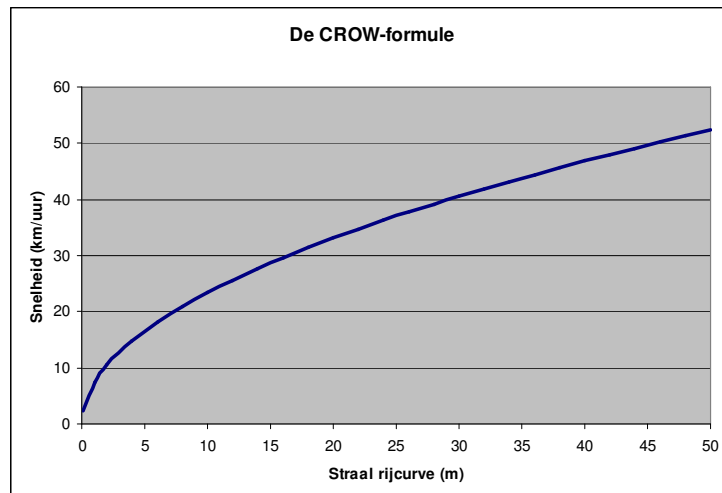
Figuur 5.4 Boogstralen op de fictieve rotonde

Aangezien de CROW-formule het meest kloppend blijkt is met die formule voor de verschillende boogstralen de snelheid berekend. Wanneer er verderop in dit verslag wordt gesproken over snelheid gaat het, tenzij anders vermeld, om de uitkomst van deze berekening.

In tabel 5.1 zijn voor de verschillende stralen van de rijcurve de snelheden weergegeven. In figuur 5.5 is te zien hoe de CROW-formule verloopt, waarmee deze snelheden zijn bepaald.

Straal (m)	Snelheid (km/uur)
12	25,6
14	27,7
17,3	30,8
20	33,1
22	34,7
24,5	36,6
26	37,7
28	39,2
30	40,5
31	41,2
33	42,5
34	43,1

Tabel 5.1 Snelheid per boogstraal



Figuur 5.5 De CROW-formule

6. CAPACITEIT

In dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan de capaciteit van de verschillende rotondes. Zowel op empirische als theoretische gronden wordt geprobeerd daar inzicht in te krijgen. Daarbij is gekeken naar twee verschillende rotondes. Één met rechtere aansluitingen (in Enschede) en één met meer schuine aansluitingen (Zeewolde). Aangezien de rotonde in Zeewolde nog niet heel erg schuin aangesloten is zal er in sommige gevallen ook nog worden gekeken naar de fictieve rotonde die nog schuin is aangesloten.

Dit onderzoek is grotendeels gebaseerd op bestaande theorie en literatuur. De belangrijkste reden hiervoor is dat voor een empirische basis rotondes nodig zijn waarop goede capaciteitsmetingen gedaan kunnen worden. Het probleem is echter dat in Nederland nauwelijks of geen rotondes zijn met schuinere aansluitingen en toch een kleine diameter. Daar komt nog bij dat de rotonde waar dat wel het geval is (Zeewolde) niet druk belast wordt. Voor een goede capaciteitsmeting is het echter vereist dat een rotonde zo druk belast is dat er wachtrijen ontstaan.

Er zijn twee mogelijke verschillen qua capaciteit tussen de rotondes. Ten eerste kan het zo zijn dat door de vormgeving de afrijcapaciteit groter is bij één van de twee typen. Ten tweede kan het ook zo zijn dat door de vormgeving rotonde- en vooral afritverkeer minder invloed heeft op de capaciteit. Eenzelfde hoeveelheid rotonde- of afritverkeer kan op één van de rotondes dus minder invloed hebben op de capaciteit dan op de andere. Het ligt dan ook voor de hand om naar beide onderdelen te kijken, hetgeen ook gedaan wordt.

In de eerste paragraaf zal worden besproken waarom wel gebruik kan worden gemaakt van de formule van Bovy ondanks dat er onvolkomenheden lijken te zitten in deze formule. Vervolgens zullen per paragraaf achtereenvolgens de afrijcapaciteit, de capaciteit als gevolg van het rotonde- en afritverkeer en een samenvoeging van beide capaciteiten worden besproken. Het hoofdstuk sluit af met een conclusie die deels ook als samenvatting gezien kan worden.

6.1. Juistheid formule

Er zijn verschillende soorten formules voor de capaciteit van toeritten. Zo zijn er voertuigvolgmodellen en hiaatacceptatiemodellen. Het ene type (voertuigvolg) gaat er vanuit dat alleen het aantal voertuigen op de rotonde (en eventueel op de afrit) van invloed is op de toeritcapaciteit. Bij de hiaatacceptatiemodellen wordt ook rekening gehouden met op welke momenten die voertuigen arriveren bij het conflictvlak.

De formule van Bovy, een voertuigvolgformule, zou een goede formule kunnen zijn om het verschil tussen de twee soorten rotondes te bepalen. Een van de redenen daarvoor is dat deze formule wordt aanbevolen door het CROW (CROW, 1998). Er dienen echter wel een paar opmerkingen te worden gemaakt.

De formule van Bovy ziet er als volgt uit:

$$C_T = \frac{1}{\gamma} \left[C_0 - \frac{8}{9} (\beta \cdot I_R - \alpha \cdot I_A) \right] \quad (6.1)$$

De capaciteit van de toerit (C_T) wordt in deze formule bepaald door de afrijcapaciteit (C_0 , vaak 1500), de intensiteit van het rotondeverkeer (I_R) en de intensiteit van het afritverkeer (I_A). De parameters voor het aantal rijstroken op de toerit (γ) het aantal rijstroken op de rotonde (β) en het afritverkeer (α) bepalen de invloed van de verschillende verkeersstromen op de toeritcapaciteit.

Bovy rekent in zijn formule elke rotonde-pae mee voor $8/9^e$ pae op de toerit. Dat wil zeggen dat bij een hoge hoeveelheid rotondeverkeer de capaciteit van het conflictvlak groter is dan de 1500 pae/uur die in Nederland als standaard wordt gezien (CROW publicatie 126 1998). Dit verschil wordt nog groter wanneer de parameter voor de invloed van het rotondeverkeer (β) kleiner is dan 1. Op locatie is echter gebleken dat juist wanneer het rustig is op de rotonde een rotondevoertuig grote invloed heeft op de capaciteit van de toerit. De volgtijd wordt dan namelijk groter waardoor het aantal pae per uur over het conflictpunt kleiner wordt. Ook zijn er in dat geval

bestuurders op de toerit die van een net acceptabel hiaat geen gebruik maken. Op het moment echter dat er veel rotondeverkeer is zullen mensen sneller invoegen/de rotonde oprijden omdat het niet gebruiken van een hiaat grotere tijdsverliezen met zich meebrengt. Dit pleit duidelijk voor een exponentieel model zoals dat van Brilon (Bijlage 1.1.2). Het nadeel van dat soort formules is echter dat de capaciteit van de toerit nooit nul kan worden. Een combinatie van beide zou ook een optie zijn zodat rekening wordt gehouden met de relatief grote invloed van het rotondeverkeer bij lage intensiteiten op de rotonde en met een maximaal aantal voertuigen dat een conflict-punt kan passeren. Voor het bekijken van de verschillen tussen de twee typen rotondes maakt het echter niets uit als er maar dezelfde formules worden gebruikt. Beide formules zijn gebruikt.

6.2. Afrijcapaciteit

De afrijcapaciteit is de capaciteit van een toerit wanneer er geen rotondeverkeer aanwezig is. Deze capaciteit is zowel te meten als te bepalen aan de hand van formules. Voor dit onderzoek zijn beide opties uitgevoerd. In deze paragraaf komen ze allebei aan de orde.

6.2.1. Meting

De afrijcapaciteit kan het beste worden gemeten op rotondes met één drukke stroom (toerit) en één minder drukke stroom (zijweg). Ook kan dat wanneer de rotonde vrij rustig is en er wel af en toe groepen voertuigen aankomen. De voertuigen kunnen dan snel achter elkaar de rotonde oprijden. Voor het bepalen van de voertuigvolgtijd is de achterkant van de voertuigen aangehouden, zoals dat ook in andere capaciteitsonderzoeken is gedaan (Van Beinum, 2007). Van die verschillende metingen is uiteindelijk een gemiddelde voertuigvolgtijd bepaald en met behulp daarvan kan de afrijcapaciteit worden bepaald. Aangezien telkens groepen van 3 tot 9 voertuigen zijn gemeten kan het zijn dat de werkelijke afrijcapaciteit lager ligt dan de gevonden waarde. Dat komt doordat er in langere periodes bijna altijd wel voertuigen zijn die minder dicht achter hun voorligger rijden of alsnog gaan stoppen voordat ze de rotonde oprijden. Voor een vergelijking tussen rotondes levert dit echter geen problemen op aangezien dan bij beide rotondes de afrijcapaciteit wordt overschat. Er zijn ook een aantal metingen gedaan om andere redenen niet zijn meegenomen. Zo zijn er soms bij nader inzien voertuigvolgtijden gemeten terwijl de voertuigen te ver uit elkaar reden. Voor de bepaling van de theoretische afrijcapaciteit zijn die metingen niet meegenomen. Bij enkele andere onderdelen worden deze metingen echter wel getoond.

Op de rotonde in Zeewolde zijn op 22 mei 2008 metingen gedaan van de voertuigvolgtijd van voertuigen die in colonne de rotonde oprijden³. In Zeewolde is het dermate rustig dat een afrijcapaciteitsmeting goed uitgevoerd kan worden. Er zijn in totaal 22 groepen auto's gemeten die goed zijn bevonden. Met behulp van de verschillende metingen is een gemiddelde volgtijd bepaald van 1,98 seconden. De theoretische afrijcapaciteit wordt dan 1818 pae/uur ($3600/1,98$). Dit is beduidend hoger dan de 1500 waar Bovy vanuit gaat. Echter zoals eerder al aangegeven kan de afrijcapaciteit over een langere periode goed lager zijn.

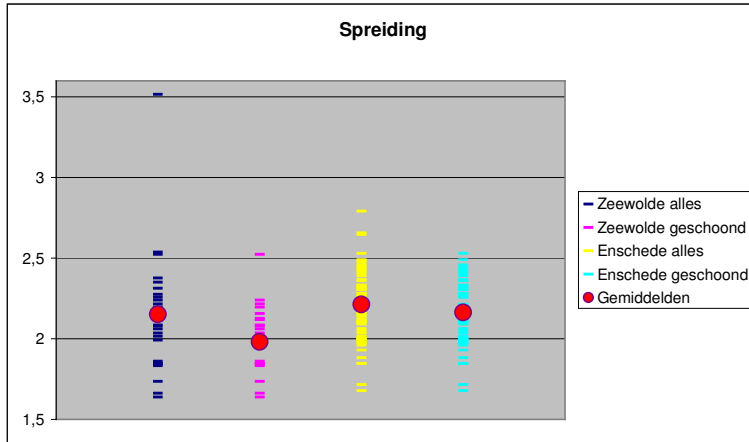
Om te kunnen vergelijken is ook in Enschede een rotonde bezocht en daar zijn dezelfde metingen gedaan voor de afrijcapaciteit⁴. Dit gebeurde op 3 juni 2008. Deze rotonde heeft rechttere aansluitingen dan die in Zeewolde. De gemiddelde volgtijd die hier gemeten is is: 2,16 seconden en daarmee wordt de theoretische afrijcapaciteit 1667 pae/uur (57 nuttige metingen). De winst van Zeewolde is in dit geval dus 9,1% ($1818/1667=1,091$).

Het is wel van belang om te kijken of de stijging ook statistisch significant is. Er is daarvoor aangenomen dat beide metingen normaal verdeeld zijn. Het blijkt uiteindelijk zo te zijn dat er daadwerkelijk een statistisch significant hogere afrijcapaciteit op de rotonde in Zeewolde is dan op de rotonde in Enschede. In bijlage 4 is te vinden hoe dit geconcludeerd kon worden.

³ Het uitgebreide verslag van de meting en het bezoek aan Zeewolde staat in bijlage 2

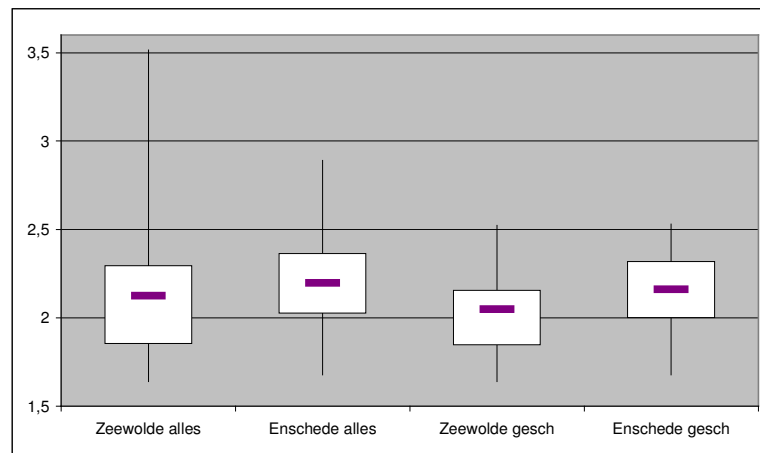
⁴ Een verslag is te vinden in bijlage 3

Aan de hand van deze waarden alleen kunnen nog geen goede conclusies worden getrokken. Het is ook interessant waar de afzonderlijke waarden zich ten opzichte het middelpunt bevinden. Daarvoor zijn de twee figuren gemaakt op de volgende pagina. Figuur 6.1 toont alle afzonderlijke waarden, terwijl figuur 6.2 boxplots weergeeft met groepen waarin 25% van alle metingen vallen.



Figuur 6.1
Spreidingsdiagram

Figuur 6.2 *Boxplot*



In het spreidingsdiagram zijn zowel alle metingen als alleen de goedgekeurde weergegeven. Zo zijn de donkerblauwe strepen alle metingen van Zeewolde (Dit komt terug in de legenda als “Zeewolde alles”). De roze strepen geven dezelfde waarden weer, alleen dan zonder de afgekeurde metingen (Legenda: “Zeewolde geschoond”). In het spreidingsdiagram is te zien dat bij Enschede (de twee rechtse reeksen) relatief veel metingen in het hoge gedeelte vallen. Dat wil dus zeggen dat er meer metingen zijn met een gemiddelde volgafstand rond en net onder de 2,5 seconden. Bij de meting in Zeewolde liggen de meeste volgtijden juist redelijk verdeeld rond de 2 seconden. Dit is vooral bij de geschoonde data goed vast te stellen.

In het boxplot worden groepen gemaakt van telkens 25% van de metingen. Als voorbeeld wordt nu gekeken naar de alle metingen van Zeewolde (“Zeewolde alles”). Daar is bijvoorbeeld te zien dat de 25% hoogste waarden liggen tussen de 2,3 en 3,5 seconden (de bovenste zwarte verticale lijn). De 25% van de metingen daaronder liggen tussen de 2,15 en 2,3 seconden (deel van de witte balk boven de streep). De 25% van de metingen waar de volgtijd nog kleiner was zijn het onderste deel van de balk en de kleinste volgtijden worden gerepresenteerd door de onderste zwarte lijn. Hoe meer metingen hier bij elkaar liggen, hoe kleiner de lijnstukken. Een korte lijn (of een korte balk) wil dus zeggen dat daar relatief veel volgtijden zijn gemeten.

Ook in het boxplot (geschoonde lijst) komt naar voren dat, hoewel het totale interval waarin de metingen vallen gelijk is, het zwaartepunt van de metingen van Zeewolde meer rond de 2 seconden ligt en dat in Enschede meer rond de 2,2 seconden. Op basis van deze gegevens lijkt een capaciteitsverschil van ongeveer 10% te bestaan.

Er lijkt dus zeker verschil in afrijcapaciteit te zijn tussen beide rotondes. Dit hoeft echter niet alleen aan de aansluiting te liggen. Zo kan het ook zijn dat door het drukke fietsverkeer op de ro-

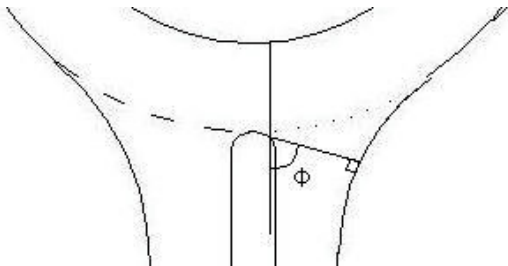
tonde in Enschede mensen meer kijken voordat ze een rotonde opgaan en minder direct achter hun voorligger aan de rotonde oprijden. Ook kan het zijn dat vanwege de drukte van het autoverkeer in Enschede mensen meer en langer opletten. Dit heeft dus niet te maken met dat er daadwerkelijk verkeer aankomt maar alleen met of de bestuurders er rekening mee houden. Op beide rotondes is namelijk alleen gemeten op momenten dat er geen conflicterend verkeer aankwam.

Een andere mogelijke fout in de meting is het verschil in rotondediameters tussen de beide rotondes. In Enschede is de binnendiameter van de rotonde 31,5 meter terwijl die in Zeewolde 34 meter is. Verschillende modellen houden ook rekening met de diameter van de rotonde voor het bepalen van de capaciteit van een rotonde. Bij een grotere diameter is de capaciteit dan hoger. De capaciteitswinst kan dus iets overschat zijn.

6.2.2. ARCADY2

In Nederland wordt altijd gekeken naar de aansluitboog van toe- en afrit. In landen als Engeland echter wordt ook gekeken naar de hoek waarmee de rotonde is aangesloten op de rotonde. Eigenlijk zeggen beide parameters hetzelfde over de aansluiting, maar toch worden ze beide gebruikt. Het Engelse model ARCADY2 (Semmens, 1985) is een model dat ook rekening houdt met de hoek van aansluiting. In een Nederlands onderzoek is gekeken naar de gevolgen van verschillende aansluithoeken en bogen op de door het model berekende invoer. Daaruit kwam naar voren dat de aansluithoek een vergroting van de capaciteit van 3,5% ten gevolge had bij een afname van de hoek van 10° . Voor de aansluitboog geldt dat er per meter die de straal groter is de capaciteit met 1 tot 3% toeneemt (Dienst Verkeerskunde, 1990). Aangezien de boog en de hoek met elkaar samenhangen is het goed om deze twee effecten samen te bekijken.

De aansluithoek is gedefinieerd als de hoek die het inkomende wegvak (de toerit) maakt met de lijn die over de straal van de rotonde loopt. Het gaat daarbij om het punt waar de rotonde wordt betreden, dus het einde van de toerit.



Figuur 6.3 Aansluithoek
tussen toerit en rotonde

Er zijn vier rotondes meegenomen in dit deel van het onderzoek. Een rotonde met de door het CROW aanbevolen minimale afmetingen, de rotondes in Enschede en Zeewolde en een fictieve rotonde met een nog grotere aansluitboog tussen toerit en rotonde.

In tabel 6.1 is te zien wat de waarden van de verschillende variabelen zijn bij de rotondes. De verschillen in capaciteit zijn ook in de tabel opgenomen en wel in de onderste twee rijen. In bijlage 5 staat beschreven hoe zowel de waarden van de variabelen als de uiteindelijke verschillen in afrijcapaciteit zijn bepaald. Hierbij wordt telkens gekeken hoeveel extra afrijcapaciteit er op een rotonde is ten opzichte van de CROW-rotonde. Zo heeft bijvoorbeeld de rotonde in Enschede volgens het model ARCADY2 7,9% meer afrijcapaciteit dan de CROW rotonde met de kleine aansluitboog. Ook is gekeken naar de capaciteit ten opzichte van de Enschedese rotonde. Hieruit is op te maken dat de rotonde in Zeewolde 3,2% meer afrijcapaciteit heeft dan de rotonde in Enschede. Bij de fictieve rotonde is dat zelfs 5,3%.

Tabel 6.1	CROW-rotonde	Enschede	Zeewolde	Fictieve
Φ	72°	66°	63°	61°
r	8	12	15	18
Cap. tov CROW	100,0	107,9	111,3	113,6
Cap. tov Enschede	92,7	100,0	103,2	105,3

6.3. Vormgeving

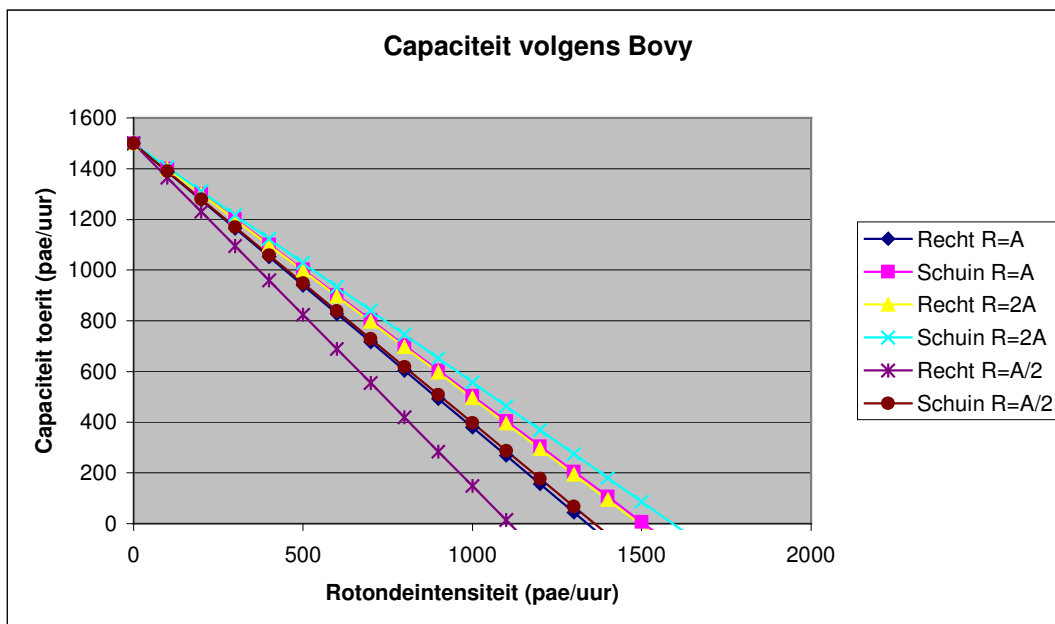
Er is nu op twee manieren bepaald wat de afrijcapaciteit van de rotondes is. Het kan, zoals eerder al aangegeven, ook zo zijn dat door de afmetingen van de verschillende onderdelen van de rotonde minder capaciteitsverlies optreedt bij hogere aantallen rotonde- en afritverkeer. Dit zou dan voornamelijk te maken hebben met een vermindering van het schijnconflict met het afslaan van de verkeer. De verschillende onderdelen zijn al door veel verschillende wetenschappers bekeken. Hieronder wordt een aantal van de uitkomsten besproken.

6.3.1. Bovy

In het onderzoek van Bovy (1991), en de daaruit voortvloeiende formule⁵, wordt rekening gehouden met verschillende vormgevingsaspecten van rotondes. Deze komen terug in de parameter α . Deze parameter geeft aan in hoeverre een afritvoertuig de toeritcapaciteit doet verminderen. De α is afhankelijk van de stralen van de rotonde en de toe- en afritten en de breedte van de toe-, afritten en middenberm. Opgemerkt dient te worden dat de breedte van de toe-, afrit en middenberm wordt gebruikt op het punt waar de toerit begint af te buigen, het begin van de aansluitboog dus. Daardoor is de verbreding van het middeneiland nabij de rotonde (Zeewolde) niet van invloed op deze formule. Grotere aansluitbogen van toe- en afrit hebben wel invloed op de α en ook de binnen- en buitenstraal van de rotonde hebben invloed.

In Bijlage 6 is te zien hoe voor zowel de rotonde in Enschede als die in Zeewolde de waarde van de invloed van het rotondeverkeer α is bepaald. Voor Enschede is die waarde 0,26 en voor Zeewolde 0,12. Dat wil dus zeggen dat een voertuig dat over de afrit rijdt naast de toerit deze in Enschede meetelt als 0,26 rotondevoertuig terwijl dat in Zeewolde slechts 0,12 is.

In Enschede tellen afritvoertuigen dus meer dan dubbel ten opzichte van de afritvoertuigen op de rotonde in Zeewolde. Vooral als er veel afslaand verkeer is zal de rotonde in Enschede dus beduidend minder toeritcapaciteit hebben dan die in Zeewolde.



Figuur 6.4 Relatie toeritcapaciteit-rotondeverkeer, Bovy

In figuur 6.4 is te zien wat de capaciteitswinst is uitgaande van gelijke afrijcapaciteiten. De verschillende lijnen staan voor verschillende hoeveelheden afritverkeer ten opzichte van het rotondeverkeer. Bij de lijnen waarbij staat " $R=A$ " geldt dat er evenveel rotondeverkeer is als afritverkeer. Bij " $R=2A$ " is het afritverkeer de helft van het rotondeverkeer en bij " $R=A/2$ " is het afritver-

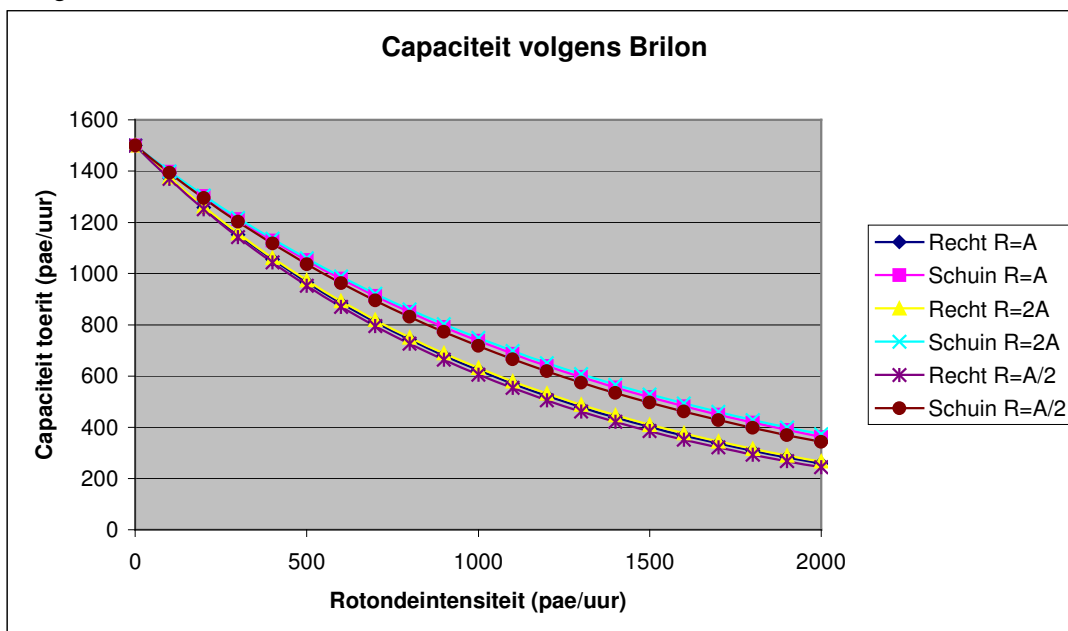
⁵ Voor een uitgebreide beschrijving van deze formule zie bijlage 1.1.1

keer het dubbele van het rotondeverkeer. Bij 500 pae rotondeverkeer zouden er dus 500 ($R=A$), 250 ($R=2A$) en 1000 ($R=A/2$) pae afritverkeer zijn.

De capaciteitswinst die uiteindelijk bereikt kan worden ligt, bij 500 rotonde-pae, op 3% (998 tegenover 1029 pae/uur), 6% of 14% (afhankelijk van de hoeveelheid afritverkeer). Bij 300 rotonde-pae wordt dat 1, 3 of 6%. Er wordt nu wel vanuit gegaan dat de afrijcapaciteit van beide rotondes gelijk is. Als dat niet het geval is, wat al eerder is aangetoond, zal de capaciteitswinst groter zijn.

6.3.2. Brilon

De formule van Brilon⁶ (Brilon, 1988) kan ook gebruikt worden om verschillen te vinden tussen de invloed van geometrische elementen op de invloed van het rotondeverkeer en het afslaand verkeer op de capaciteit van de toerit. Daartoe is het van belang dat de invloed van het rotondeverkeer (B) in de formule voor de verschillende rotondes wordt bepaald. Aangezien de rotondes niet van dien aard waren dat er normale capaciteitsmetingen konden worden uitgevoerd is het niet mogelijk om de parameterwaarde van B te bepalen. Het is wel mogelijk om andere onderzoeken te raadplegen die de waarde van de parameter hebben bepaald. Zo heeft Van Beinum (2007) voor verschillende rotondes de B bepaald. Zo is de waarde van B bij een rotonde met een aansluitboog bij de toerit van 12 meter 8,51 (rotonde Schipluiden). Ook is er bepaald in hoeverre het afritverkeer van invloed is op de toeritcapaciteit. Er is gevonden dat een afrit-pae in dit geval voor 0,28 rotonde-pae moet tellen. Bij een andere rotonde met grotere aansluitbogen (circa 16 meter) was de waarde van B 6,82 (rotonde Bergschenhoek). Dit was niet alleen het gevolg van een schuinere aansluiting, maar het had ook te maken met een bredere middengeleider (10 meter). Een waarde voor de parameter van het meetellen van het afritverkeer kon hier echter niet worden bepaald vanwege een gebrek aan data. Er wordt uiteindelijk aangenomen dat deze gelijk is aan die van de rotonde in Schipluiden. De parameterwaarde voor de invloed van het afritverkeer die is gevonden door Van Beinum representeert in het geval van de grotere aansluitbogen dus het verschil in invloed van het afritverkeer. De invloed van het afritverkeer wordt ook verwacht af te nemen op de rotonde van Zeewolde ten opzichte van die in Enschede. Daarom kan het gebruik van de formule van Brilon met de twee parameterwaarden ook een indicatie zijn van het gevolg van de verschillende aansluitingen. De uitkomsten moeten echter wel met een korreltje zout worden genomen.



Figuur 6.5 relatie toeritcapaciteit-rotondeverkeer, Brilon

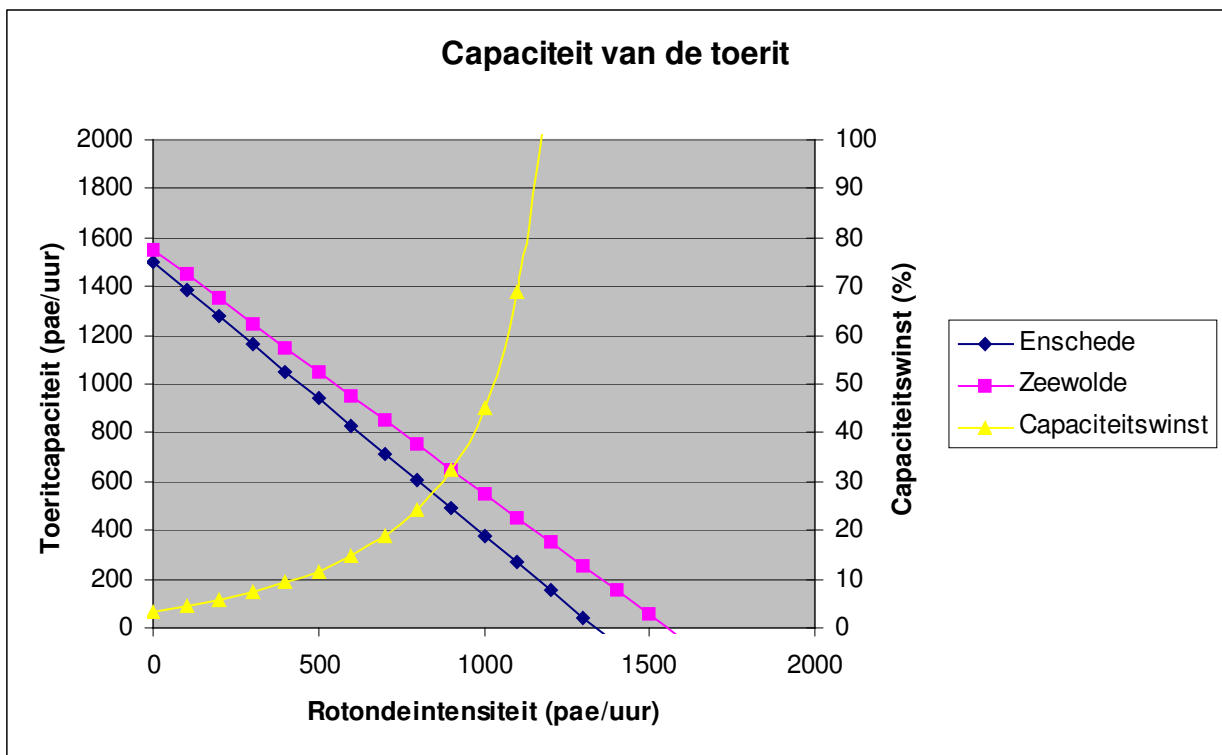
⁶In bijlage 1.1.2 wordt de formule van Brilon besproken.

Met deze cijfers in de hand kan worden gekeken wat bij verschillende situaties het gevolg is voor de capaciteit van de toerit. Dit staat in figuur 6.5 (vorige pagina) weergegeven. In die grafiek is te zien dat de lijnen die de rechte aansluitingen vertegenwoordigen bij elkaar staan en die van de schuine aansluitingen staan ook bij elkaar. De lijnen van Enschede (recht) en Zeewolde (schuin) staan juist een stuk van elkaar af. Er is dan ook duidelijk een capaciteitswinst als de waarde van B kleiner wordt. De invloed van het afritverkeer is niet al te groot in deze formule. Het maakt voor de capaciteit dus niet veel uit of de helft van het verkeer afgaat voor op de afrit voor de toerit of 33% of 67%.

De capaciteitswinst die uiteindelijk bereikt kan worden ligt, bij 1000 rotonde-pae, op ongeveer 18%. Bij minder rotonde-pae (500 en 300) wordt dat 9 en 5%. Er wordt hierbij wel vanuit gegaan dat de afrijcapaciteit gelijk is voor beide rotondes. Als dat niet het geval is zal de capaciteitswinst nog groter zijn. De rotonde met de schuinere aansluitingen heeft dus minder capaciteitsverlies bij hogere hoeveelheden rotonde- en afritverkeer. Daardoor is de capaciteit van de rotonde met schuine aansluitingen groter dan die met rechtere aansluitingen.

6.4. Totale effect

Tot dusver zijn de twee soorten capaciteitswinst afzonderlijk bekeken. In deze paragraaf wordt een totaalbeeld gegeven van de winst in capaciteit die kan worden geboekt met een schuinere aansluiting. Hiertoe worden beide effecten samengenomen en grafisch weergegeven. Vervolgens zal ook worden ingegaan op de weergave en zal kritisch worden gekeken naar de uitkomsten.



Figuur 6.6 Toeritcapaciteit en capaciteitswinst

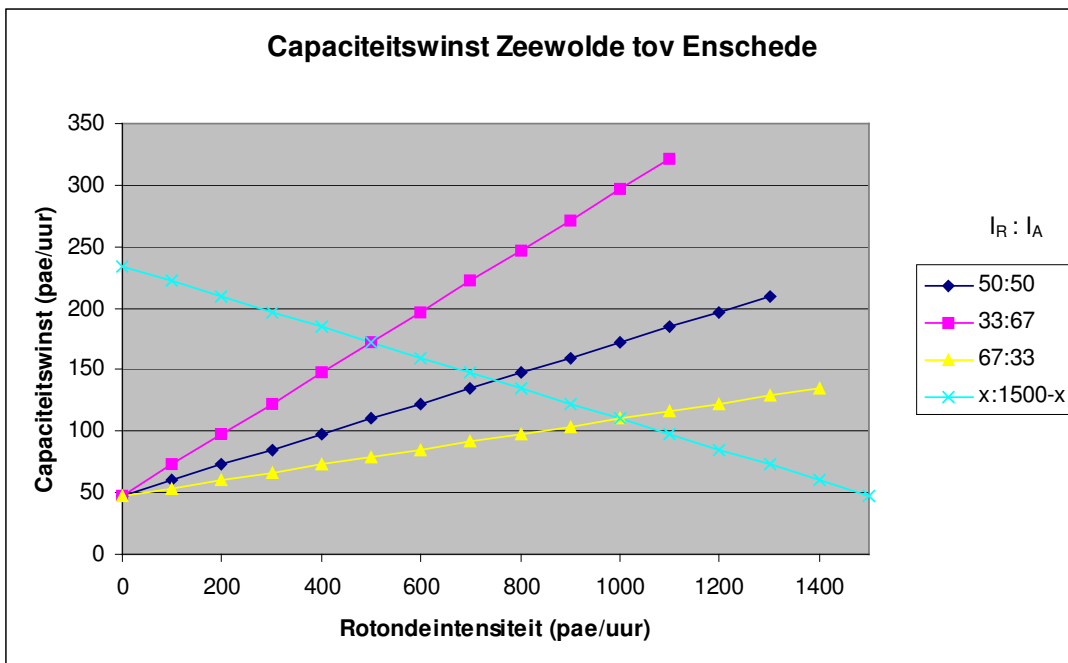
Als de effecten bij elkaar opgeteld worden dan krijg je de capaciteitsgrafiek zoals in figuur 6.6 staat. Hierbij is gebruik gemaakt van de uitkomsten van ARCADY2 en de formule van Bovy. Dit zijn beide lineaire vergelijkingen en zijn dus goed bij elkaar op te tellen. Tevens beschrijven ze beide andere verschijnselen en zijn de twee verschijnselen niet van elkaar afhankelijk. Het is dus geen probleem om de effecten bij elkaar op te tellen. De formule van Bovy wordt gekozen omdat daarmee met behulp van de aanwezige gegevens een verschil kan worden berekend terwijl bij de formule van Brilon gebruik gemaakt moet worden van ander onderzoek. Er dient gezegd te worden dat wanneer er gebruik wordt gemaakt van de winst van de afrijcapaciteit die gevonden is door de eigen metingen de verschillen nog groter zouden zijn. Hier is echter niet voor gekozen

omdat al gebleken is dat de verschillen ook door andere factoren zoals verkeersintensiteiten kunnen zijn beïnvloed.

Om de capaciteitswinst inzichtelijk te maken is er vanuit gegaan dat de rotonde in Enschede voldoet aan de afrijcapaciteit van 1500 pae, zoals Bovy die heeft vastgesteld. Dit is tevens de in Nederland geldende waarde voor de vuistregel van de conflictpunbelasting. Verder dient ook vermeld te worden dat ervoor is gekozen de rotondevoertuigen en de afritvoertuigen aan elkaar gelijk te stellen. In figuur 6.6 zijn de verschillende capaciteiten weergegeven en is ook de relatieve capaciteitswinst meegenomen.

In de figuur is de toeritcapaciteit van beide rotondes (Enschede en Zeewolde) weergegeven. Tevens is de relatieve capaciteitswinst weergegeven (gele lijn). Deze lijn geeft weer hoeveel procent hoger de capaciteit in Zeewolde is ten opzichte van Enschede. Er is te zien dat in alle gevallen de capaciteit in Zeewolde groter is dan in Enschede. Ook is te zien dat de relatieve capaciteitswinst eerst vrij langzaam oploopt en vervolgens bij grote hoeveelheden rotondeverkeer omhoog schiet. Dit komt doordat de capaciteit in die gevallen daalt en het absolute verschil tussen beide rotondes alleen maar toeneemt. De procentuele capaciteitswinst bij een lage toeritcapaciteit ziet er dan wel spectaculair uit, maar in die gevallen is het beter naar de absolute aantallen te kijken. Het gaat om ongeveer 50 pae/uur capaciteitswinst wanneer er geen rotondeverkeer aanwezig is en zo'n 200 pae/uur bij 1300 pae rotondeverkeer per uur.

In de gevallen dat het rotondeverkeer en het afritverkeer zich anders tot elkaar verhouden zal de capaciteitswinst ook anders zijn. De grafieken voor de verschillende hoeveelheden afritverkeer worden weergegeven in figuur 6.7. In die figuur is de absolute capaciteitswinst van verschillende verhoudingen tussen rotondeverkeer en afritverkeer weergegeven. Zo zal bij een grote hoeveelheid afritverkeer (roze lijn) meer winst kunnen worden geboekt en bij een kleinere hoeveelheid (gele lijn) minder. Als er echter vanuit wordt gegaan dat op de rotonde voor de voorgaande afrit 1500 pae per uur rijden en het aantal afrit-pae dus kleiner wordt bij een grotere hoeveelheid rotondeverkeer zal de winst telkens kleiner worden (lichtblauwe lijn). Wat opvalt is dat niet alle lijnen stoppen bij eenzelfde hoeveelheid rotondeverkeer. Dit komt doordat het verschil alleen is weergegeven wanneer beide toeritcapaciteiten positief zijn. Aangezien bij hoge hoeveelheden afritverkeer eerder één van de capaciteiten negatief zal worden stoppen die grafieken ook eerder.



Figuur 6.7 Capaciteitswinst bij verschillende hoeveelheden afritverkeer

In de bovenstaande figuur is duidelijk een capaciteitswinst te zien van de rotonde in Zeewolde ten opzichte van die in Enschede. De vraag is echter of er met alleen formules wat te zeggen valt over de werkelijke capaciteit. Idealiter moeten er daadwerkelijke capaciteitsmetingen uitgevoerd

worden. Hiervoor zijn echter drukke rotondes nodig. De rotonde in Zeewolde een van de weinige rotondes is met een grotere aansluitboog en toch een relatief klein middeneiland. Het probleem is echter dat het op deze rotonde niet druk genoeg is voor een capaciteitsmeting. Hiervoor zijn namelijk wachtrijen nodig die op geen enkel moment ontstaan in Zeewolde. Het is dan nu ook nog niet goed mogelijk om met behulp van metingen de capaciteitsverschillen in kaart te brengen. Als er in de toekomst meer rotondes worden aangelegd zoals die in Zeewolde wordt dit wel mogelijk.

6.5. Conclusie

In dit hoofdstuk is de capaciteit van rotondes op verschillende manieren bekeken. Zoals gebruikelijk is gekeken naar de capaciteit van de toerit. In deze laatste paragraaf wordt teruggeblikt op de verschillende benaderingen en wordt een algehele conclusie getrokken omtrent de capaciteit van de twee rotondes, die in Enschede en Zeewolde.

Ten eerste is er gekeken naar de formule die over het algemeen wordt gebruikt in Nederland om de capaciteit van een toerit te berekenen. Daarbij is opgemerkt dat de formule van Bovy niet geheel aan de verwachtingen en de observaties voldoet. Dit voornamelijk wat betreft de effecten van rotondevoertuigen op de toeritcapaciteit. Het lijkt namelijk logischer dat bij een lager aantal rotondevoertuigen het effect van een extra rotondevoertuig groter is dan bij een hoger aantal rotondevoertuigen. Bovy gaat echter uit van een effect van het rotondeverkeer dat altijd gelijk is. Voor het gebruik in dit onderzoek maakt dit gegeven echter niet uit, aangezien het slechts om een vergelijking gaat en niet om een echte capaciteitsbepaling.

In het tweede deel van het hoofdstuk is ingegaan op de afrijcapaciteit van beide rotondes. Zowel met behulp van metingen als met bestaande formules is die bepaald. Uit de metingen blijkt dat de afrijcapaciteit 9 á 10% hoger is op de rotonde met schuinere aansluitingen (Zeewolde). Er moet echter wel voorbehoud worden gemaakt omdat dit waarschijnlijk niet geheel aan de vormgeving te wijten is, maar ook aan de drukte op de rotonde en de diameter van de rotonde.

De afrijcapaciteit is ook bepaald met behulp van de formules die worden gebruikt in het programma ARCADY2 dat uit het Verenigd Koninkrijk komt. De afrijcapaciteit van de rotonde in Zeewolde die daarmee werd bepaald was 3,2% hoger dan die in Enschede. Tevens is een inzicht gegeven in hoe twee andere rotondes presteren met deze formules, te weten een rotonde die nog krappere is dan die in Enschede en één die nog vloeiender aansluit dan die in Zeewolde. De capaciteit was uiteindelijk zoals verwacht groter bij grotere aansluitbogen en daarmee gepaard gaand ook met kleinere aansluithoeken.

Na het verschil in afrijcapaciteit is ook bekeken wat het verschil wordt qua invloed van het rotondeverkeer en het verkeer dat voor de toerit afslaat (afritverkeer). Met behulp van twee formules (Bovy en Brilon) is gekeken wat de capaciteitswinst is van de rotonde in Zeewolde ten opzichte van die in Enschede. Deze winst is bij beide formules vrij groot en vooral bij grote hoeveelheden rotondeverkeer procentueel hoog.

Uiteindelijk zijn de twee soorten capaciteitswinst bij elkaar gevoegd. Daarbij is gebruik gemaakt van de formules uit het programma ARCADY2 en de formule van Bovy. De absolute capaciteitswinst voor de toerit is bekeken voor verschillende hoeveelheden afritverkeer en rotondeverkeer. Door de aansluiting schuinere te maken kan een capaciteitswinst worden behaald van 50 tot 325 pae/uur (bij een vergroting van de straal van de aansluitboog van 12 naar 15 meter).

Er kan geconcludeerd worden dat zeker op basis van de theorie de capaciteit van schuinere toeritten groter is dan die toeritten die rechter aangesloten zijn. Ook de empirie geeft een hogere (afrij)capaciteit. Echter die zou ook deels door andere variabelen, zoals de intensiteit van motorvoertuigen en fietsers, verklaard kunnen worden. Vanuit de empirie lijkt het dan ook zo dat de capaciteit bij schuinere aansluitingen groter is, maar dit kan niet met zekerheid gezegd worden. Wel is het zo dat de capaciteitswinst statistisch significant is.

7. VERKEERSVEILIGHEID

In dit hoofdstuk zal de verkeersveiligheid van de twee rotondes worden besproken. Ook zal de fictieve rotonde die eerder al in het hoofdstuk over capaciteit aan de orde is geweest worden meegenomen. Voornamelijk de verschillen tussen de rotondes zullen worden belicht. Vanwege het ontbreken van bruikbare ongevaldata zal worden gekeken naar eerder uitgevoerd onderzoek en zal ook een theoretische beschouwing worden gegeven over een aantal verkeersveiligheidsaspecten.

Eerst zal worden ingegaan op een grote hoeveelheid literatuur die beschikbaar is over het verkeersveiligheid op rotondes. Vervolgens zal worden gekeken naar de taakbelasting van automobilisten. Ook zal er worden gekeken wat er voor modellen en formules bekend zijn die wat over de verkeersveiligheid kunnen zeggen. Dit hoofdstuk zal besluiten met een conclusie waarin alle bevindingen nog eens naast elkaar gelegd worden.

7.1. Literatuur

Er zijn al verscheidene onderzoeken uitgevoerd over de verkeersveiligheid van rotondes. Ook de vormgeving van de rotondes komt daarbij vaak om de hoek kijken. In deze paragraaf zal worden besproken wat er is onderzocht en wat de conclusies zijn. Er is gekozen voor een chronologische volgorde zodat eventueel voortschrijdend inzicht duidelijk wordt. Aan het einde van de paragraaf zal een overzicht worden gegeven van de bevindingen van de verschillende onderzoekers.

7.1.1. Onderzoeken

Bakker (1983) onderzocht twee snelwegknooppunten in Friesland die destijds waren uitgevoerd als rotonde/verkeersplein. Ondanks dat de voorrangsregeling daar anders was dan op de rotondes van tegenwoordig is het toch interessant om zijn bevindingen te bekijken. Hij onderzocht de capaciteit van de rotonde en de objectieve en subjectieve verkeersveiligheid. Hij komt tot de conclusie dat op de rotonde waar hogere snelheden worden gehaald (Joure) minder ongevallen per passage plaatsvinden. Ook vinden er niet meer ernstige ongevallen plaats. Relatief gezien worden er op de rotonde met de hogere snelheden minder kop-staartbotsingen plaats en meer ongevallen bij het afslaan en meer eenzijdige ongevallen. Als wordt gekeken naar de subjectieve verkeersveiligheid dan komt ook naar voren dat de rotonde Heerenveen verkeersonveiliger wordt bevonden dan die bij Joure. Dit zou kunnen worden verklaard, aldus Bakker, doordat passages vaak veiliger worden geacht als het rustig is. Aangezien de rotonde in Joure rustiger is kan dit dus een verklaring zijn. Ook het zicht op oprijdende voertuigen en het oriënteren en bepalen van de richting van de bestemming blijken belangrijke onderdelen te zijn van het gevoel van verkeersveiligheid. Over het algemeen geldt dat hoe lastiger dit wordt gevonden hoe groter de subjectieve verkeersonveiligheid. Aangezien beide rotondes snelwegknooppunten zijn is er geen sprake van fietsers op of rond de rotonde. Over fietsers trekt Bakker dan ook geen conclusies.

Maycock & Hall (1984) zijn twee van de eerste onderzoekers die onderzoek hebben gedaan naar de ongevallen op rotondes en de invloeden van de geometrie op het aantal ongevallen. Dit hebben zij gedaan door voor verschillende rotondes het aantal ongevallen in een bepaalde periode vast te stellen (1974-1979). Het blijkt onder andere dat het aantal voertuigen op de toerit een belangrijke indicator is voor alle soorten ongevallen. Verder zijn er voor verschillende soorten ongevallen verschillende indicatoren van het aantal letselongevallen. Deze worden in de volgende alinea's besproken.

Bij de ongevallen tussen rotondeverkeer en toeritverkeer vinden zij drie geometrische onderdelen die statistisch significant zijn, te weten: de diameter van het middeneiland, de hoek tussen de afzonderlijke armen en de maximale rijcurve op de toerit. Bij de rijcurve is het verband zo dat er gemiddeld meer ongevallen gebeuren wanneer er een grotere straal wordt bereden. Voor de hoek tussen de verschillende armen geldt dat de hoek het beste zo groot mogelijk kan zijn. Bij 4 armen wordt dat dus 4 maal 90° en bij 3 armen 3 maal 120°. Ook de breedte van de toerit is statistisch significant, echter de breedtes die gebruikt worden (4,8-18,8 meter) komen op

enkelstrooks rotondes in Nederland nauwelijks voor. Overigens is het totale aantal ongevallen niet kleiner bij een smalle toerit aangezien het aantal ongevallen op de toerit zelf bij een smalle toerit juist toeneemt. Er zijn ook nog een aantal variabelen die minder invloed hebben op de uitkomst en dan ook minder van belang zijn.

Bij de ongevallen op de toerit zelf zijn er weer andere variabelen en zijn de relaties soms ook omgekeerd. Zo leidt een grote straal van de rijcurve in dit geval tot een lager aantal ongevallen. Een kleinere zichtafstand leidt ook tot minder ongevallen. Dit is overigens één van de soorten ongevallen waarbij een brede toerit leidt tot minder letselongevallen.

Voor eenzijdige ongevallen zijn weer deels andere variabelen van belang. Wel blijft het zo dat een soepele entree van de rotonde leidt tot minder ongevallen. Het is echter ook van belang hoe de toeleidende weg voor de toerit eruit ziet. Dit omdat de ongevallen tot 20 meter van de rotonde worden meegenomen in de analyse. Ook de zichtafstand en de breedte van de toerit zijn hier weer van belang, waarbij een grotere zichtafstand/breedte tot meer ongevallen leidt.

De overige ongevallen en de voetgangersongevallen zijn verder voornamelijk afhankelijk van de groottes van de verschillende verkeersstromen op de rotonde. Bij de voetgangers spelen de voetgangers uiteraard een rol en bij de overige ongevallen wordt het percentage motorrijders nog meegenomen.

De onderlinge relaties tussen de afmetingen van de elementen en het aantal ongevallen zijn ook door de onderzoekers bepaald. Het model dat daarbij is ontwikkeld is weergegeven in bijlage 1.3.1. Dit model zal verderop in dit onderzoek worden gebruikt voor het bepalen van te verwachten ongevallen op drie rotondes (paragraaf 7.3.2). Maycock & Hall hebben zelf met dit model al wel ideale stralen voor de aansluitboog gevonden. Bij toeritten met een constante breedte is dat volgens hen 60 meter en bij wijd uitlopende toeritten is dat 20 meter. Aangezien dit rapport Engels is bestaat er een vrij grote kans dat dit vooral ideaal is voor meerstrooksrotondes. Voor enkelstrooksrotondes kan dat goed anders (kleiner) zijn.

In een inventarisatie van Van Minnen (1988) worden verschillende aanbevelingen gedaan voor rotondes. Hij baseert zich daarbij op verschillende onderzoeken die buiten Nederland zijn uitgevoerd. Een belangrijke conclusie is dat middeneilanden niet te klein mogen zijn omdat dan meer ongelukken gebeuren tussen rotonde- en toeritverkeer. Een te groot middeneiland is echter ook niet bevorderlijk voor de verkeersveiligheid omdat de snelheid dan meestal omhoog gaat.

Bulpitt & Harrison (1983, in Van Minnen, 1988) stellen dat snelheidsreductie alleen kan worden bereikt door een sterke kromming toe te passen bij de toerit van een rotonde. De afrit heeft volgens hen nauwelijks effect. Verder bevelen zij aan om een volledig tangentiële aansluiting te vermijden.

Layfield & Maycock (1986, in Van Minnen, 1988) hebben specifiek naar de verkeersveiligheid van fietsers gekeken en concluderen onder andere dat er relatief meer fietsers een letselongeval krijgen op een rotonde dan op een gewone kruising. Ook blijken minirotondes en dubbelstrooksrotondes extra gevaarlijk voor fietsers. Ook is in het onderzoek een inventarisatie gemaakt van de soorten ongevallen met fietsers die op rotondes voorkomen. Zo blijkt liefst 50% van de ongevallen met fietsers te maken te hebben met het niet voorrang verlenen van een automobilist op de toerit aan een fietser op de rotonde. Het is opvallend dat slechts 10% van de ongevallen tussen een fietser en een voertuig dat de rotonde wil verlaten plaatsvindt. Dat wil dus zeggen dat juist op het punt waar de aansluitboog het kleinste is de meeste ongevallen met fietsers plaatsvinden. De geometrie van de toeritten is dus essentieel voor de verkeersveiligheid van een rotonde.

Le Coz (1982,1983, in Van Minnen, 1988) komt volgens Van Minnen met een aantal aanbevelingen voor rotondes. Zo stelt hij bijvoorbeeld dat de afrondingsstralen van de toeritten rond de 18 á 20 meter moeten zijn. Ook raadt hij aan om de rotondediameter niet te groot te maken, de rijbaan niet te breed te dimensioneren en rotondes goed te signaleren.

Van Minnen zelf trekt aan het einde van zijn beschouwing een aantal conclusies. Één daarvan is dat er terughoudend moet worden omgesprongen met het aanleggen van rotondes op punten waar veel (brom-)fietsers passeren en waar naderingssnelheden hoog zijn. Verder concludeert hij onder andere dat rotondes veiliger zijn, maar dat voor (brom-)fietsers dit niet echt het geval lijkt te zijn.

Het verslag van de bijeenkomst over rotondes in Nantes in 1992 biedt ook veel aanknopingspunten voor dit onderzoek. Uit dit verslag zijn een aantal bijdragen nuttig.

Zo is er het stuk van Guichet (1992). In dat onderzoek is aangegeven hoeveel ongelukken op welke plekken op rotondes gebeuren. Zo was 36,6% van de ongevallen te wijten aan het weigeren voorrang te verlenen. Het aandeel eenzijdige ongevallen bedraagt 30,2% en kop-staartbotsingen op de toerit zijn 7,4% van het totaal. De overige ongevallen, zoals die op afritten, op zebrapaden en dode-hoek ongevallen komen beduidend minder voor.

Ter gelegenheid van dezelfde bijeenkomst schreven Brilon & Stuwe (1992) over rotondes in Duitsland. Daarin wordt een aantal aanbevelingen gedaan over hoe rotondes eruit moeten zien. Zo wordt aanbevolen de armen radiaal en niet tangentiaal aan te laten sluiten op de rotonde. Ook moet er rekening worden gehouden met de maatgevende voertuigen. Een buitendiameter van 30 meter wordt in Duitsland dan ook als minimaal gezien.

Een rapport van het Transport Research Laboratory beschrijft specifiek het grote aantal ongevallen met fietsers op rotondes (Davies, D.G., Taylor, M.C., Ryley, & Halliday, 1997). Daarin worden onder andere redenen gezocht voor dit relatief hoge aantal. De waarschijnlijk belangrijkste reden hiervoor is dat bestuurders van motorvoertuigen fietsers niet kunnen of willen zien. Doordat fietsers ten opzichte van andere weggebruikers vrij klein zijn kan het zijn dat ze moeilijk te zien zijn. Ook blijkt vaak dat fietsers minder als bedreiging worden gezien, waardoor er ook minder op deze groep weggebruikers gelet wordt. Tevens speelt het mee of er veel of weinig fietsers zijn. Als er veel zijn dan is het gebruikelijker om een fietser tegen te komen en zal dus ook beter worden gelet op fietsers.

Er is ook gekeken wat het veranderen van de geometrie van rotondes voor gevolgen heeft. Hun conclusie is onder andere dat een scherpere aansluitboog leidt tot minder ongevallen tussen toerit- en rotondeverkeer, maar tot meer eenzijdige ongevallen en ongevallen op de toerit. Dit is bepaald door verschillende Britse rotondes te herontwerpen en vervolgens met het programma ARCADY/3 het aantal ongevallen te berekenen van beide rotondes. De formules die in ARCADY3 worden gebruikt wat betreft verkeersveiligheid komen uit het onderzoek van Maycock & Hall (1984).

Arndt (1999) bespreekt in één van zijn onderzoeken twee belangrijke parameters voor de verkeersveiligheid van rotondes. Deze parameters zijn het potentiële relatieve snelheidsverschil tussen voertuigen en de snelheidsvertraging tussen opvolgende geometrische elementen.

Het potentiële relatieve snelheidsverschil is in dit verband afhankelijk van de snelheden van de voertuigen en de hoek waarmee de wegen van beide voertuigen elkaar kruisen. Voor de verschillende rotondes in dit onderzoek is ook de potentiële relatieve snelheid berekend (paragraaf 7.3.1). Hiermee is ook vastgesteld hoeveel ongevallen tussen rotondeverkeer en toeritverkeer er plaats vinden per rotonde (paragraaf 7.3.3).

Één van de conclusies is dat de snelheden laag moeten zijn om zo het aantal ongelukken binnen de perken te houden. Ook wordt aangegeven dat de relatieve snelheid het best minder dan 40 km/uur zou kunnen zijn. Die relatieve snelheid kan omlaag worden gebracht door de rotondediameter groter te maken, de toerit smaller te maken en de aansluitboog van de toerit klein te laten zijn. Er zal echter een optimaal punt zijn qua aansluithoek aangezien op een gegeven moment de hoek zo groot wordt dat de relatieve snelheid alleen maar toeneemt terwijl de feitelijke snelheid wel afneemt. Tevens kan de snelheid bij hoge aanvangssnelheden het best worden verlaagd door in fasen af te laten remmen. De snelheidsvermindering per opvolgend element zou dan niet meer mogen zijn dan 20 km/uur.

Arndt heeft ook nog de ongevallen op 100 rotondes in Queensland (Australië) gecategoriseerd. Daaruit blijkt dat wel 50% van de ongevallen plaatsvindt op het conflictvlak van toerit en rotonde. Andere ongevallen kwamen beduidend minder voor, zoals eenzijdige ongelukken (17,7%), kop-staartbotsingen op de toerit (16,9%) en ongevallen bij de afrit (6,3%).

Arndt (2001) deed ook onderzoek naar verschillende formules die aan de hand van geometrische kenmerken van rotondes het gemiddelde aantal ongevallen berekenen. Er zijn voor verschillende

soorten ongevallen verschillende formules bepaald (voor de relaties, zie bijlage 1.3.2). Uit die formules is af te leiden wat de gevolgen zijn van verschillende veranderingen van de vormgeving van de rotonde. Zo is te zien dat hogere snelheid voor de rotonde en kleinere boogstralen leiden tot meer eenzijdige ongevallen. Snelheid is bij de kop-staartbotsingen de enige variabele die met de vormgeving te maken heeft. Het aantal rijstroken is wel van invloed, maar gezien dit onderzoek niet van belang. Ook bij ongevallen tussen toerit- en rotondeverkeer speelt de snelheid een rol. Die is echter een stuk kleiner dan bij de andere gevallen. Voor dit type ongevallen geldt echter dat een groter middeneiland, en daarmee samenhangend de tijd die wordt gereden tussen de vorige toerit en het conflictpunt op de rotonde, leidt tot minder ongevallen.

Uiteindelijk benoemt Arndt de 4 belangrijkste variabelen⁷ en geeft hij aan wat wel en niet bevorderlijk is voor de verkeersveiligheid. De aanbevelingen:

- De toerit mag niet te tangentiaal worden aangesloten.
- Het snelheidsverschil tussen opeenvolgende elementen mag niet te groot zijn.
- De toe- en afrit mogen niet te dicht bij elkaar liggen.

Lawton, Webb, Wall & Davies (2003) hebben onderzoek gedaan naar vier rotondes in Engeland die zijn omgebouwd van een typische Britse manier van rotondebouw (schuine aansluiting met klein middeneiland) naar een “continentale” rotonde met een groter middeneiland. De aansluiting wordt wel iets rechter, maar nog steeds niet zo recht als in Nederland.

Duidelijke conclusies over een grotere veiligheid zijn niet te trekken, echter onveiliger is het zeker niet. Een groter middeneiland leidt tot grotere veiligheid voor fietsers. Dat geldt ook voor fietsstroken voor de plek waar bestuurders de rotonde oprijden en een krappere geometrie.

Daniels en Wets (2006) hebben recentelijk nog gekeken naar de verkeersveiligheid van Vlaamse rotondes. Er wordt specifiek gekeken naar bestaande richtlijnen in verschillende westerse landen over rotondes. Ook worden de uitkomsten van onderzoek in verschillende landen naar de verkeersveiligheid van rotondes besproken.

Eerst wordt van alle geometrische elementen van rotondes besproken wat wordt aangeraden voor een grote verkeersveiligheid. De aanbevelingen die van toepassing zijn op dit onderzoek zijn hieronder puntsgewijs weergegeven:

- Beplanting of verticale elementen aanbrengen om de zichtbaarheid te verbeteren. Dit is voornamelijk van belang omdat onveilige situaties kunnen ontstaan wanneer een rotonde te laat wordt opgemerkt. Zo zouden dan bijvoorbeeld kop-staartbotsingen kunnen ontstaan en ook eenzijdige ongevallen.
- Leg het middeneiland aan op het punt waar de middellijnen van de verschillende takken elkaar snijden. Mocht dit niet het geval zijn probeer dan meer naar links aan te sluiten zodat de toerit een rechtere hoek maakt met de rotonde zelf.
- Maak het middeneiland cirkelvormig zodat er op de rotonde zelf geen extra stuurbewegingen nodig zijn. Dit is vooral gunstig voor het aantal eenzijdige ongelukken.
- De stralen van de rotonde (binnen-, buitenstraal en de straal van de overrijdbare strook) moeten zijn aangepast op het ontwerpvoertuig. Dit voertuig moet de rotonde vlot en soepel kunnen passeren.
- Boogstralen bij toeritten kunnen het beste kleiner zijn dan die bij afritten, andersom is in ieder geval niet juist. De aansluitingen kunnen radiaal zijn (Vlaanderen en Nederland) of vooral bij grotere rotondes (meer) tangentiaal (VS, VK en Frankrijk).
- Alleen lage beplanting bij fietsoversteek in het kader van de zichtbaarheid.

Er worden ook nog enkele conclusies getrokken door de onderzoekers. De belangrijkste staan hieronder:

- Middengeleiders hebben veel voordelen zoals: Duidelijkere herkenning van een rotonde, capaciteitsverhogend (minder schijnconflict), mogelijkheid tot oversteken in twee fasen (fietsers en voetgangers).

⁷ De curve op de toerit, de maximale vermindering van de snelheid tussen opeenvolgende elementen, de hoek tussen de armen en de lengte van de horizontale elementen.

7.1.2. Overzicht

In de verschillende onderzoeken zijn enkele onderdelen terug te vinden. Sommige onderzoeken hebben bekeken wat voor ongevallen er plaatsvinden op rotondes. In tabel 7.1 staat voor de verschillende onderzoeken hoeveel procent van de ongevallen bij welke categorie hoort. Daarbij is uitgegaan van de typen ongevallen zoals die door Maycock & Hall (1984) zijn geïdentificeerd. Daarbij is ook nog het aantal ongevallen op de afrit meegenomen. Aangezien de onderzoeken allen buitenlands zijn is een ongeval bij de afrit bijna altijd een ongeval tussen een afslaand voertuig op een binnenste baan van de rotonde die een ander voertuig op de buitenste snijdt. Deze vinden dan dus op meerstrooksrotondes plaats. Er is ook voor gekozen om in de tabel een regel op te nemen om de range waar het aantal ongevallen ongeveer in ligt weer te geven. Zo kan een beter algemeen beeld worden opgemaakt over het aantal ongevallen op rotondes.

Onderzoek	rotonde-toerit	kop-staart	eenzijdig	Afrit	overig
Layfield & Maycock (1986) ⁸	50%	?	?	10%	?
Guichet (1992)	36,6%	9,9%	30,2%	5,9%	10,4% (voetg.) 7% (rest)
Arndt (1999)	50,8%	16,9%	17,7%	6,3%	3,2% (na rotonde) 5,1% (rest)
Weijermars (2001) Fietzers in voorrang	54,2% ⁹	1,3%	16,0%	-	28,6%
Weijermars (2001) Fietzers uit voorrang	34,1% ⁹	5,1%	45,3%	-	15,5%

Tabel 7.1 Percentages ongevaltypen

In de tabel is te zien dat het aantal ongevallen tussen rotonde en toeritverkeer vaak het grootst is. Daarna volgen de eenzijdige ongevallen en de kop-staartongevallen. De overige ongevallen zijn soms ook vrij groot, maar deze bestaan uit allerlei soorten ongevallen en kunnen dus niet aan de hand van geometrische variabelen worden bekeken.

Naast de studies die hebben bekeken wat voor soort ongevallen plaatsvinden zijn er ook studies die de verkeersveiligheid van (onderdelen van) schuine aansluitingen hebben onderzocht. Over het algemeen komt daaruit naar voren dat er meer ongevallen plaatsvinden tussen rotonde- en toeritverkeer en dat er minder eenzijdige en kop-staartongevallen plaatsvinden.

Ook zijn er studies uitgevoerd die leiden tot bepaalde aanbevelingen over de geometrie van rotondes. De belangrijkste aanbevelingen van enkele onderzoeken staan in tabel 7.2.

Onderzoek	Aanbevelingen
Le Coz (1982 & 1983)	Straal aansluitingsbogen 18 à 20 meter
Brilon & Stuwe (1992)	Radiale aansluiting, buitendiameter minimaal 30 meter
Arndt (1999)	Maximale potentiële relatieve snelheid: 40 km/uur Maximale vermindering snelheid per element: 20 km/uur
Daniels & Wets (2006)	Verlengde toerit moet op middeneiland uitkomen Stralen van de aansluitboog bij toeritten kleiner dan bij afritten

Tabel 7.2 Aanbevelingen onderzoekers

Als laatste zijn er studies die per geometrisch element hebben gekwantificeerd wat het aantal ongevallen is. De twee besproken onderzoeken (Maycock & Hall, 1984 en Arndt, 1999) zullen terugkomen in paragraaf 3 van dit hoofdstuk over het berekenen van de verkeersveiligheid met behulp van modellen.

⁸ Alleen ongevallen met fietsers

⁹ Ongevallen waarbij de toedracht ligt in het niet voorrang geven. Dit kan dus ook op de afrit zijn.

7.2. Taakbelasting

Een andere manier om naar de verkeersveiligheid van rotondes te kijken is de taakbelasting in ogenschouw te nemen. In dat geval wordt dus naar de variabele gekeken die tussen de rotonde-geometrie (onafhankelijke variabele) en het aantal ongevallen (afhankelijke variabele). Dat wil zeggen dat de geometrie de taakbelasting bepaalt en met de taakbelasting gekeken kan worden wat de te verwachten onveiligheid is. Andere onderzoeken naar de verkeersveiligheid gebruiken dit ook (o.a. Weijermars, 2001). De taakbelasting wordt bekeken aan de hand van een taakanalyse. De taken die een bestuurder moet uitvoeren worden daarbij bekeken en er wordt geanalyseerd of dat tot moeilijkheden leidt. De uitgevoerde taakanalyse is terug te vinden in bijlage 7. In het tweede deel van deze paragraaf wordt ingegaan op de uitkomsten van een onderzoek naar oogbewegingen op rotondes en wat met dat daarmee gezegd kan worden over de verschillende rotondes.

7.2.1. Uitkomsten taakanalyse

Uit de taakanalyse komen voor de verschillende soorten ongevallen ongevalverwachtingen naar voren die groter dan wel kleiner worden bij een vergroting van de aansluitbogen op rotondes. Hieronder is voor elk type ongeval beschreven wat er zal veranderen bij schuinere aansluitingen.

Het aantal ongevallen tussen rotondeverkeer en verkeer dat de rotonde oprijdt zal waarschijnlijk toenemen. Dit omdat de snelheden hoger liggen op schuin aangesloten toeritten. De automobilisten hebben daardoor minder tijd om fietsers en andere weggebruikers te detecteren en zullen zo eerder een verkeersdeelnemer over het hoofd zien. Tevens zal de aard van de ongevallen gemiddeld genomen erger zijn vanwege de hogere snelheden.

Op het aantal ongevallen op de toerit (veelal kop-staartbotsingen) werken de variabelen tegengesteld aan elkaar. Zo leidt de kortere tijd die er is om te detecteren of er kruisend verkeer is tot meer onverwachts remmen (als het conflicterende verkeer laat alsnog wordt gedetecteerd) wat weer tot meer ongevallen leidt. Doordat de toerit soepeler aansluit zal er echter minder afgeremd hoeven te worden en zal er ook minder extreem afgeremd hoeven te worden, in het geval van een late detectie van de rotonde. Ook zal er minder onnodig (hard) geremd hoeven te worden voor verkeer dat de afrit neemt, maar dit niet aangeeft (schijnconflict wordt minder).

De eenzijdige ongevallen worden vooral beïnvloedt door hoe soepel een wegvak bereden kan worden. Het aantal ongevallen waarbij slechts één voertuig/verkeersdeelnemer betrokken is zal dan ook kleiner zijn naarmate de rotonde schuinere aangesloten is.

7.2.2. Complexiteit rijtaak

Laya (1988) heeft ook onderzoek gedaan naar de belasting van, in dit geval alleen, automobilisten. Daarbij liet hij verschillende bestuurders verschillende rotondes berijden en analyseerde daarbij de fixatie van de ogen. Hij keek onder meer naar de tijdsduur van en de hoeveelheid fixaties. Er zijn twee rotondes bekeken met zowel tangential als radiale toe- en afritten. Hieruit zijn een aantal dingen te halen die belangrijk zijn voor de verkeersveiligheid van rotondes.

Er is bijvoorbeeld gekeken naar verschillen in fixaties tussen toeritten met hoge en met lage snelheid. Lage snelheid is in dit geval lager dan 40 km/uur en hoge snelheid is meer dan 50 km/uur. Laya heeft gevonden dat bij een lagesnelheidstoerit de fixatietijd naar links, waar voertuigen vandaan komen die een botskoers zouden kunnen hebben, lager is. Er is dus een minder lange fixatie nodig om te zien of er wel of niet een voertuig aankomt. Aangezien er ook nog sprake is van een snelheidsverschil is het aantal meters dat extra wordt afgelegd tijdens het fixeren bij een hogesnelheidstoerit dus een behoorlijk stuk hoger dan bij een toerit die met lage snelheid wordt bereden. Aangezien de snelheden op beide bekeken typen rotondes in de lage categorie van dit onderzoek (Laya, 1988) vallen kunnen uit de gevonden waarden geen conclusies getrokken worden. Wat wel duidelijk lijkt is dat bij een hogere snelheid de fixatietijd langer is en de fixatieafstand een grotere factor langer is.

7.3. Gebruik van modellen

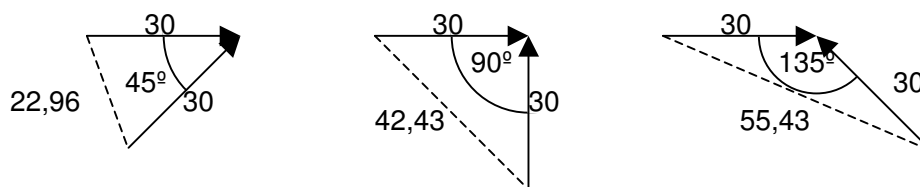
Er zijn verschillende modellen en methodes bekend waarmee de verkeersveiligheid van rotondes kan worden ingeschat. Er zijn veiligheidsparameters (paragraaf 7.3.1) die een handvat bieden. Ook zijn er door verschillende onderzoekers vergelijkingen en formules opgesteld die een schatting geven van het gemiddelde aantal ongevallen op een rotonde met bepaalde geometrische kenmerken (paragraaf 7.3.2 en 7.3.3). Uiteindelijk zal van die twee modellen worden berekend welke beter is (paragraaf 7.3.4).

7.3.1. Veiligheidsparameters (Arndt)

In de eerste paragraaf van dit hoofdstuk is het onderzoek van Owen K. Arndt besproken (Arndt, 1999). Hij beschrijft twee belangrijke parameters van de relatie tussen de geometrie van wegen en de veiligheid. Het gaat hier om de potentiële relatieve snelheid tussen voertuigen en de snelheidsvermindering tussen opeenvolgende geometrische elementen. In dit deel van het verslag wordt bekeken wat de potentiële relatieve snelheid is bij het meest voorkomende type ongeval, die tussen rotondeverkeer en toeritverkeer.

Potentiële relatieve snelheid

De potentiële relatieve snelheid is de snelheid die twee tegen elkaar botsende voertuigen ten opzichte van elkaar kunnen hebben. Een aantal voorbeelden is weergegeven in figuur 7.1.



Figuur 7.1 Voorbeelden potentiële relatieve snelheid

De pijlen in de bovenstaande figuur stellen voertuigen voor die botsen. De stippellijn beeldt de relatieve snelheid uit. In alle gevallen rijden de beide voertuigen 30 km/uur. De relatieve snelheden zijn echter verschillend. Er is onder andere te zien dat een tegengestelde richting leidt tot een grotere potentiële relatieve snelheid.

De snelheid van de voertuigen en de hoek waarop ze elkaar mogelijk tegenkomen zijn te bepalen. In tabel 7.3 staat van zowel de rotonde in Enschede als die in Zeewolde weergegeven hoe groot de potentiële relatieve snelheid is. Voor de snelheid is telkens de snelheid genomen die is bepaald met behulp van de CROW-snelheidsformule. Het gaat dan telkens om de maximale snelheid op één van de toeritten en op de rotonde. De hoek is bepaald aan de hand van de rijlijnen op de rotonde, die in het hoofdstuk over snelheid al aan de orde zijn gekomen. De hoek is telkens bepaald op het moment dat voertuigen zouden kunnen botsen. Er is wel rekening gehouden met enige breedte van de voertuigen zodat de hoek niet is bepaald op het snijpunt van de wegen van de voertuigen, maar op het punt waar de hoekpunten van de voertuigen (vaak de plek waar de koplampen zitten) elkaar tegen zouden komen.

	Enschede	Zeewolde	Fictief
Snelheid toerit (km/uur)	36,6	39,2	41,2
Snelheid rotonde (km/uur)	30,8	33,1	34,7
Hoek (°)	27	22	18
Pot. rel. snelheid (km/uur)	16,73	15,02	13,50

Tabel 7.3 Potentiële relatieve snelheden

Er is te zien dat de potentiële relatieve snelheid in Zeewolde kleiner is dan in Enschede. Dat is dus een aanwijzing dat de rotonde in Zeewolde niet onveiliger hoeft te zijn ondanks de hogere

snelheden die op die rotonde gehaald worden. Dit kan echter niet hard gemaakt worden. De aanbeveling van Arndt (1999) is namelijk dat de relatieve snelheid op de toerit van een rotonde niet hoger mag zijn dan 40 km/uur terwijl de relatieve snelheid op alle rotondes veel lager ligt.

Snelheidsvermindering tussen opeenvolgende geometrische elementen

De andere belangrijke parameter is de snelheidsvermindering per geometrisch element. Arndt (1999) geeft een aantal aanbevelingen over de maximale snelheidsvermindering per element. Zo wordt een snelheidsvermindering per element van 20 km/uur maximaal geacht voor kruisingen. Binnen de bebouwde kom zou in dat geval een toerit met 30 km/uur bereden moeten kunnen worden (als je er vanuit gaat dat er over het algemeen 50 km/uur wordt gereden. Als de snelheid lager ligt dan 30 km/uur dan wordt er teveel afgeremd en is de rotonde/toerit dus onveiliger.

Op de rotonde in Zeewolde zijn volgens eigen metingen de snelheden in alle gevallen boven de 30 km/uur. Dat wil zeggen dat de snelheidsvermindering binnen de gestelde marge valt. Ook met de CROW-formule is de snelheid op alle toeritten hoger dan 30 km/uur. Voor Enschede geldt hetzelfde. Ook daar liggen de snelheden bij het betreden van de rotonde boven de 30 km/uur.

Qua snelheidsverlaging per element valt geen van de rotondes dus in het kritieke gebied. De voertuigen kunnen dan ook met rechte wegen worden toegeleid naar de rotonde.

7.3.2. Slachtoffers (Maycock & Hall)

Zoals al eerder aangehaald hebben Maycock & Hall (1984) formules opgesteld om het verband tussen vormgeving en slachtoffers op een rotonde te beschrijven. De onderzoekers hebben voor verschillende typen ongevallen verschillende formules opgesteld. In bijlage 1.3.1 zijn die verschillende formules beschreven. Hier worden die formules gebruikt om de verschillen tussen de rotondes te bepalen op het gebied van de verkeersveiligheid. Er wordt gekeken naar de rotonde in Enschede, die in Zeewolde en een fictieve rotonde die nog schuinere aansluitingen heeft dan die in Zeewolde (straal aansluitboog = 18 meter). Er is bij deze rotondes alleen gekeken naar de invloed van de aansluitboog. In werkelijkheid is de breedte van de toerit op de rotondes in Enschede en Zeewolde niet gelijk. Aangezien de breedte van de toerit buiten het onderzoek valt wordt hier niet naar gekeken. In werkelijkheid kan het ook zijn dat op verschillende rotondes verschillende zichtafstanden zijn. Voor een bepaling van het verschil tussen de aansluitingen is dit echter niet van belang. De zichtafstand is dus ook niet meegenomen.

Er is voor gekozen om uit te gaan van het index getal 100 voor de situatie in Enschede. Vervolgens wordt voor alle soorten ongevallen bepaald wat het gemiddelde aantal ongevallen is op de andere rotondes en dat wordt omgezet in een indexgetal (zie tabel 7.4). Als dat getal hoger is dan 100 dan wordt verwacht dat er meer ongevallen zijn en als het lager is dan wordt verwacht dat het minder is dan in Enschede. Door die te vergelijken kan een beeld worden gegeven van de verkeersveiligheid van de rotondes ten opzichte van de redelijk standaard rotonde in Enschede.

Type ongeval	Enschede	Zeewolde	Fictief
Toerit-rotonde	100	119,4	134,9
Kop-staart	100	91,3	85,7
Eenzijdige ongevallen	100	90,1	83,8

Tabel 7.4 *Ongevallen per rotonde (Maycock & Hall)*

Er is te zien dat bij een grotere aansluitboog het aantal ongevallen tussen toerit- en rotondeverkeer toeneemt. Voor Zeewolde is de toename ongeveer 20% en voor de fictieve rotonde ongeveer 35%. Voor ongevallen op de toerit en eenzijdige ongevallen wordt de rotonde juist veiliger met grotere aansluitingen. De relatieve verschillen zijn daar echter kleiner.

Het is interessant om deze uitkomsten met de uitkomsten van de taakanalyse te vergelijken. Het blijkt dat bij zeker twee van de typen ongevallen de taakanalyse dezelfde relatie liet zien. Zo is ook daar voorspeld dat het aantal ongevallen tussen rotondeverkeer en toeritverkeer groter wordt en dat het aantal eenzijdige ongevallen zou afnemen. Bij de taakanalyse kon niet veel ge-

zegd worden over het aantal kop-staartongevallen op de toerit. Maycock en Hall voorspellen minder ongevallen. Dat de aansluiting soepeler is heeft dan dus meer effect dan de gestegen snelheid op deze ongevallen. Uit de taakanalyse bleek namelijk dat de verhoogde snelheid leidde tot meer ongevallen van dit type en een soepeler aansluiting juist minder kop-staartongevallen als gevolg heeft.

7.3.3. Slachtoffers (Arndt)

Niet alleen Maycock & Hall hebben bekeken wat voor invloed geometrie heeft op ongevallen op rotondes. Ook de Australiër Owen K. Arndt (1998, beschreven door Arndt, 2001 en Robinson, 2000) heeft formules opgesteld voor ongevallen op rotondes. Er is echter wel een belangrijk verschil. Zo gaat Arndt veel meer uit van snelheid dan alleen van hoeken en bogen van aansluitingen. Bij de ongevallen tussen rotonde- en toeritverkeer speelt juist de potentiële relatieve snelheid, zoals bepaald in paragraaf 7.3.1, een doorslaggevende rol. De precieze formules zijn te vinden in bijlage 1.3.2.

In tabel 7.5 is weergegeven wat de verschillen zijn tussen de rotondes. De manier van weergegeven is gelijk aan die bij de ongevalformules van Maycock & Hall.

Type ongeval	Enschede	Zeewolde	Fictief
Toerit-rotonde	100	86,1	64,0
Kop-staart	100	137,5	175,3
Eenzijdige ongevallen	100	77,5	63,8

Tabel 7.5 *Ongevallen per rotonde (Arndt)*

Opvallend is dat Arndt andere relaties legt dan Maycock & Hall. Zo gaat hier het aantal ongevallen tussen rotonde- en toeritverkeer juist omlaag bij grotere aansluitbogen. Dit heeft te maken met de kleinere potentiële relatieve snelheid op de rotondes met grotere aansluitbogen. Ook bij het aantal kop-staartongevallen is de relatie tegenovergesteld aan die gevonden door Maycock & Hall. Dit komt doordat Maycock & Hall bij een grotere aansluitboog (hogere snelheid) minder ongevallen voorspellen terwijl Arndt bij een hogere snelheid juist meer ongevallen voorspelt. Bij het aantal eenzijdige ongevallen zijn de relaties wel gelijk, maar is het effect bij Arndt juist veel groter. Het aantal eenzijdige ongevallen neemt dus sterker af bij een grotere aansluitboog.

Als wordt vergeleken met de taakanalyse dan klopt de relatie nu alleen bij de eenzijdige ongevallen. Bij het aantal ongevallen tussen toerit- en rotondeverkeer is de relatie tegenovergesteld en bij het aantal kop-staartbotsingen wordt alleen gekeken naar de snelheid en wordt het soepeler kunnen berijden van de rotonde dus niet meegenomen. Daardoor is het aantal kop-staartongevallen hier ook vrij hoog.

7.3.4. Keuze Slachtoffermodel

Om een beeld te krijgen van de effecten van de verschillen van de rotondes op de verkeersveiligheid is het goed om één van de twee, hiervoor beschreven, methodes te kiezen. Er moet in ieder geval een duidelijk verschil in verkeersveiligheid per soort ongeval worden bepaald.

In de door Maycock & Hall (1984) gebruikte formules zijn de relaties tussen de elementen en de verkeersveiligheid het meest vergelijkbaar met de uitgevoerde taakanalyse. Twee van de drie relaties kloppen namelijk zeker terwijl dat bij Arndt (2001) één van de drie is.

Een tweede punt dat in het voordeel spreekt van de formule van Maycock & Hall is dat de uitkomsten niet heel erg extreem zijn. Zo is bijvoorbeeld het aantal ongevallen van een bepaald type in Zeewolde met hun formule nooit meer dan 20 procent groter of kleiner. Dit terwijl bij Arndt de verschillen 15 tot 38 procent zijn. Gezien de niet al te extreme veranderingen ligt het voor de hand dat er geen extreme verschillen in het aantal ongevallen op de rotondes zijn.

Verder is er onduidelijkheid over de formules van Arndt die in het nadeel van die formules werkt. Zo is het niet geheel duidelijk wat nu precies het punt is waar de conflicthoek berekend moet worden. Het zou bijvoorbeeld best kunnen zijn dat de berekende hoek op een ander punt is bepaald dan het punt waar Arndt de hoek bepaald. Ook is het niet geheel duidelijk waarom bij het aantal eenzijdige ongevallen de snelheid op een element wordt opgeteld bij de snelheidsvermin-

dering daarvoor. Hierdoor zou dus alleen de snelheid op het wegvak voor de rotonde van belang zijn. In plaats van die op de toerit. Dit klinkt niet logisch. Een ander punt is dat voor de formule van Arndt eigenlijk 85-percentiel snelheden moeten worden gebruikt. Aangezien er geen gegevens beschikbaar zijn van de werkelijke snelheden op de rotondes is echter de maximale snelheid gebruikt die afhankelijk is van de straal van de bereden weg.

Het is wel een goed idee om de relatieve snelheid mee te nemen in de verkeersveiligheid van een rotonde. Tot op heden gebruiken Maycock & Hall namelijk alleen de aansluitboog tussen toerit en rotonde. Het verschil in relatieve snelheid zou in dit geval het hogere aantal ongevallen bij de rotondes met de grotere aansluitbogen verminderen.

Dit alles in ogenschouw nemend is de formule van Maycock & Hall het beste om het aantal ongevallen, en daarmee de verkeersonveiligheid, te schatten. Het aantal ongevallen tussen rotonde-verkeer en toeritverkeer zou echter lager kunnen liggen wanneer rekening wordt gehouden met de relatieve snelheid tussen twee voertuigen die mogelijk botsen. Over de verkeersveiligheid van fietsers is op deze manier echter nog niet heel veel te zeggen omdat in Australië (Arndt) en het Verenigd Koninkrijk (Maycock & Hall) niet veel fietsers aanwezig zijn in het verkeersbeeld.

Met de gekozen formule wordt het aantal eenzijdige ongevallen 9,9% lager, het aantal kop-staartbotsingen 8,7% lager en het aantal ongevallen tussen rotonde- en toeritverkeer 19,4% hoger. Om een algeheel beeld te krijgen van de toename van het aantal ongevallen is met behulp van de door Weijermars (2001) gevonden ongevalhoeveelheden (paragraaf 7.1.2) de totale toename of afname van het aantal ongevallen berekend. Het onderzoek van Weijermars is in dit geval gekozen omdat dit vrij recent is (2001), omdat het ongevallen in Nederland beschrijft en omdat er onderscheid gemaakt is voorrangregelingen voor fietsers. Voor fietsers in de voorrang wordt het aantal ongevallen dan 12,3% hoger en voor fietsers uit de voorrang 2,0% hoger. Hierbij moet wel worden aangetekend dat het kop-staartongevallen een stuk kleiner is in het onderzoek van Weijermars dan in de andere onderzoeken. Mocht dit nog groter zijn dan is de stijging kleiner.

7.4. Zichtbaarheid

Om ook voor de fietsers inzichtelijk te maken of wat de verschillen in verkeersveiligheid zijn tussen de rotondes is een zichtanalyse uitgevoerd. Eerder in dit hoofdstuk werd vastgesteld dat er op de toerit behoorlijk veel ongevallen met fietsers plaatsvinden vergeleken met de afrit. In het hoofdstuk over snelheid is te zien dat de snelheid op de afrit juist hoger is dan die op de toerit. Dit maakt het dus onwaarschijnlijk dat snelheid alleen van belang is bij de bepaling van het aantal ongevallen. Een reden voor het grote aantal ongevallen op de toerit kan het gebrek aan zichtbaarheid van het voertuig dat voorrang dient te krijgen zijn. Het gaat daarbij vooral om de zichtbaarheid van fietsers en die de toerit moeten oversteken. In deze paragraaf zal getracht worden een beeld te geven van het zicht op de rotondes in Enschede en Zeewolde en op de fictieve rotonde. Daarbij dient aangemerkt te worden dat alleen wordt gekeken naar verschillen in aansluiting. Of er wel of geen begroeiing of een kunstwerk in de weg staat wordt niet behandeld. Er wordt verder ook niet gekeken naar verschil in zichthoeken terwijl de toerit al aan het afbuigen is naar de rotonde. Dat wordt niet meegenomen omdat die aansluiting pas echt merkbaar wordt na de fietsoversteek. Voor de zichtbaarheid van fietsers is het verschil in aansluitboog zelf dus niet van belang. De in snelheid zijn echter wel van belang. Hier is dus naar gekeken.

De analyse van de zichtbaarheid zelf is weergegeven in bijlage 8. Er blijkt niet erg veel verschil te zitten tussen de rotondes. Bij alle drie de rotondes zijn de fietsers op het moment dat er nog net afgeremd kan worden ruim in het zichtveld van de bestuurder wanneer hij door de voorruit kijkt. Ook op de momenten daarvoor fietst de fietser niet in de dode hoek. De dode hoek zal alleen doorkruist worden wanneer de fietser en de auto behoorlijk dicht bij de rotonde zijn. Een fietser kan wel in de dode hoek rijden wanneer er langzaam wordt gereden door de auto, meestal bij congestie. In dat geval is er echter niet veel verschil tussen de rotondes omdat op de rotondes dezelfde snelheden zullen worden gereden.

De zichtbaarheid kan ook worden beïnvloed door omgevingsfactoren. Zo kunnen er struiken zijn of kan door stilstaande vrachtwagens of huizen het zicht worden ontnomen. De omgevingsfactoren zijn per rotonde anders. Daardoor heeft het geen nut om in deze vergelijking tussen rotondes deze factoren mee te nemen. Dit laat echter onverlet dat de zichtbaarheid dus wel degelijk een belangrijke factor kan zijn bij de veiligheid van een specifieke rotonde op een specifieke locatie.

7.5. Conclusie

In dit hoofdstuk is op verschillende manieren ingegaan op de verkeersveiligheid van drie rotondes, te weten die in Enschede, Zeewolde en de fictieve rotonde met grotere aansluitbogen (straal = 18 meter). De verschillende benaderingen zijn: een literatuuronderzoek, een analyse van de taakbelasting, het berekenen van het aantal ongevallen met behulp van bestaande modellen en een analyse van de zichtbaarheid van fietsers.

Uit de literatuur komt naar voren dat schuinere aansluitingen van rotondes op verschillende typen ongevallen verschillende effecten hebben. Zo neemt het aantal ongevallen tussen rotondeverkeer en toeritverkeer dat de rotonde oprijdt toe bij een schuinere aansluiting. Voor het aantal kopstaartbotsingen en het aantal eenzijdige ongevallen geldt juist het tegenovergestelde. Daar neemt het aantal ongevallen juist af naarmate de aansluiting schuiner is.

Vergelijkbare uitkomsten zijn te onttrekken uit de uitgevoerde taakanalyse. Er is daarbij gekeken naar de belasting op de automobilist op verschillende punten op de rotonde. Het enige wat minder duidelijk te concluderen was uit de taakanalyse is of er meer of juist minder ongevallen plaatsvinden bij schuinere aansluitingen. Wel blijkt dat de tijd en zeker de afstand die gebruikt moet worden om conflicterende fietsers en auto's te detecteren toeneemt bij hogere snelheden. Hogere snelheden zijn weer een gevolg van schuinere aansluitingen.

Uit modellen blijkt dat het aantal eenzijdige ongevallen afneemt met 10 tot 22% als wordt gekeken naar Enschede en Zeewolde. De fictieve rotonde presteert 16 tot 36% beter dan de rotonde in Enschede op dit punt. Bij de andere twee ongevaltypen die het meest voorkomen zijn de twee modellen het oneens. Het Australische model berekent 14 en 36% (Zeewolde respectievelijk Fictief ten opzichte van Enschede) minder ongevallen tussen rotonde- en toeritverkeer. Het Engelse model komt uit op een toename van 19 en 35 %. Dit ligt voornamelijk in de gebruikte verklarende variabele. Ook bij kop staart botsingen spreken de modellen elkaar tegen. Berekent het Australische model een toename van 38 en 75%, het Engelse model komt tot een afname van 9 en 14%. Opnieuw is het verschil in verklarende variabelen hier debet aan. Uit de vervolgens gemaakte analyse komt het Britse model als beste naar voren. Wel zou er ook nog rekening kunnen worden gehouden met de relatieve snelheid van het Australische model.

De uitgevoerde zichtanalyse leverde geen duidelijke verschillen op tussen de drie rotondes die ook in de rest van het hoofdstuk zijn bekeken. Bij hoge snelheden zijn de fietsers tijdig door de voorruit te signaleren en bij lage snelheden (congestie) is er geen reden om aan te nemen dat op de ene rotonde harder of anders wordt gereden dan op de andere. Het enige verschil op die rotondes zal plaatsvinden na de fietsoversteek (de fietsstrook).

Wanneer de verkeersveiligheid als geheel wordt beschouwd kan worden geconcludeerd dat er waarschijnlijk wat meer ongevallen zijn op de rotondes met schuinere aansluitingen dan op die met de rechter (2% bij fietsers uit de voorrang en 12% bij fietsers in de voorrang). Wel blijft het van belang om de verschillende soorten ongevallen te onderscheiden aangezien dezelfde veranderingen aan de geometrie van de toerit tegenovergestelde gevolgen hebben op de verschillende soorten ongevallen.

Over de verkeersveiligheid van fietsers kan wel iets gezegd worden, maar niet heel veel. Bij fietsers vinden relatief veel ongevallen plaats bij het passeren van de toerit van de auto's. Aangezien dit type ongevallen vaker voorkomt wordt de rotonde voor fietsers onveiliger. In welke mate dat is kan echter niet worden gezegd. Wel is het zo dat ook de relatieve snelheid hier toeneemt aangezien de hoek waarmee de fietsers en de auto's elkaar kruisen niet verandert en de snelheid van de auto's toe zal nemen. Wat betreft de zichtbaarheid van fietsers is er tussen de verschillende aansluitbogen van de rotondes geen verschil.

8. CONCLUSIE

In dit rapport is verslag gedaan van een onderzoek naar de effecten van schuinere aansluitingen op de capaciteit en verkeersveiligheid van rotondes. Er is daarbij gebruik gemaakt van bestaande literatuur, er zijn taak- en zichtanalyses uitgevoerd en er zijn metingen gedaan. Met de uitkomsten daarvan kunnen nu conclusies worden getrokken over die effecten. In dit hoofdstuk zal dat dan ook gebeuren. Ook is nog een aantal aanbevelingen worden gedaan over mogelijk vervolgonderzoek.

8.1. Conclusies

8.1.1. Beantwoording deelvragen

Om duidelijke conclusies te kunnen trekken is het goed om terug te grijpen naar de opgestelde onderzoeksvragen. Door deze te beantwoorden is een beeld te geven van de conclusies van dit onderzoek.

Over welke rotondes zijn gegevens te verzamelen? Welke rotondes kunnen met elkaar worden vergeleken?

Er zijn van twee bestaande rotondes gegevens verzameld. Ook zijn er twee fictieve rotondes meegenomen bij een aantal onderdelen van het onderzoek.

Wat is de capaciteit van de rotondes?

In het onderzoek is gefocust op de verschillen tussen de rotondes. De rotonde met de grotere aansluitbogen (straal 15 om 12 meter) heeft bij verschillende hoeveelheden rotonde en afritverkeer 50 tot 200 pae per uur meer capaciteit dan de rotonde met de rechte aansluitingen.

Er zijn indicatieve metingen uitgevoerd waaruit bleek dat de afrijcapaciteit op de schuinere aansluitingen ongeveer 9% hoger is dan bij de rechte aansluitingen. Dit verschil is tevens statistisch significant.

Wat is verkeersveiligheid en hoe is dat te meten?

Verkeersveiligheid is gedefinieerd als "Het veilig zijn in het verkeer". De kans op een ongeval en de gevolgen daarvan zijn de variabelen die bepalen hoe groot de verkeersveiligheid is. Dit is te meten door ongevalgegevens van verschillende wegvakken of kruispunten te vergelijken. Een andere manier van de bepaling van de verkeersveiligheid is het gebruik van bestaande formules.

Hoe is het gesteld met de verkeersveiligheid op de rotondes?

Aangezien er verschillende soorten ongevallen zijn die allen op verschillende manieren afhankelijk zijn van rotondeparameters is het lastig een algemeen beeld te geven over de verkeersveiligheid op de verschillende rotondes. Met behulp van ongevalformules kan wel worden geconcludeerd dat het aantal ongevallen tussen toerit- en rotondeverkeer wat minder dan 20% hoger is op de schuinere aansluiting. Voor de eenzijdige ongevallen en de kop-staartbotsingen geldt juist een daling van 9 à 10%. Wel zal vanwege de snelheidstoename de ernstigheid van de ongevallen licht toenemen. Voor fietsers in de voorrang wordt de algehele toename van het aantal ongevallen 12% en bij fietsers uit de voorrang 2%.

Zijn de gevonden capaciteit en verkeersveiligheid representatief genoeg?

Er zijn wel een aantal aanmerkingen te maken bij de gevonden waarden. Zo is bij de gemeten afrijcapaciteit niet duidelijk of de capaciteitswinst geheel toe te schrijven is aan de verschillen van de aansluitbogen. Bij de andere bepalingen van de capaciteit is gebruik gemaakt van buitenlandse formules. Dit kan de betrouwbaarheid van de uitkomsten aantasten vanwege mogelijk verschillende situaties en omstandigheden in andere landen.

De gevonden verschillen in verkeersveiligheid zijn alleen met bestaande en ook vrij oude (1984) buitenlandse modellen gedaan. Dat leidt tot mogelijke fouten in de uitkomsten. Omdat in die landen vaak meerstrooksrotondes liggen en er minder fietsers zijn dan in Nederland.

Kloppen bestaande snelheidsformules?

De in Nederland gebruikte formule blijkt een goede indicatie te geven van de bestaande maximumsnelheden op de rotondes. De Amerikaanse formule geeft een systematische onderschatting van die maximumsnelheid.

8.1.2. Algehele conclusie

Uit dit onderzoek blijkt dat er ook met een kleine aanpassing van de aansluitboog tussen de toerit en de rotonde een behoorlijke capaciteitswinst bereikt kan worden van 50 à 200 pae/uur. De hiermee gepaard gaande verkeersveiligheidseffecten zijn waarschijnlijk niet al te groot. Er zijn wisselende relaties tussen de vormgeving van de toeritten en het aantal ongevallen. Daarom is het afhankelijk van het aantal ongevallen per soort op een bepaalde rotonde of een andere vormgeving onveiliger is. Met behulp van ongevalcijfers uit een ander onderzoek is bepaald dat bij fietsers in de voorrang de toename van het aantal ongevallen 12% is en bij fietsers uit de voorrang 2%. Ook moet er rekening worden gehouden met wat zwaardere ongevallen aangezien de snelheid omhoog gaat.

De gebruikte methodes voor de bepaling van de capaciteit en verkeersveiligheid zijn voornamelijk gebaseerd op theorie. Of in de praktijk de capaciteit ook hoger is en wat de feitelijke verkeersveiligheid is bij verschillende aansluitingen is dan ook niet te zeggen. Wel komen de conclusies van de verschillende gebruikte methodes behoorlijk goed overeen. Ook blijkt dat de capaciteitswinst statistisch significant is.

8.2. Aanbevelingen

Het grootste deel van dit onderzoek is ingegaan op bestaande literatuur. Om een nog beter beeld te krijgen van wat er werkelijk op rotondes met schuinere aansluitingen gebeurt zou het goed zijn om meer praktijkmetingen uit te voeren. Er zullen dan dus metingen moeten worden gedaan op rotondes met verschillende aansluitingen. Idealiter zou gemeten moeten worden op rotondes die dusdanig worden belast dat er capaciteitsomstandigheden optreden. Dat wil zeggen dat op de toerit van de rotonde constant een wachtrij moet staan. Hierdoor wordt de werkelijke capaciteit het beste benaderd (De Leeuw, 1997). Het probleem is echter dat er weinig tot geen rotondes zijn met groter aansluitbogen en kleine rotondediameters. Om dit goed te kunnen testen zou dan ook eventueel een bestaande (drukke) rotonde kunnen worden omgebouwd tot een rotonde met aansluitbogen van 18 of 20 meter. Er zijn dan al twee metingen mogelijk, namelijk voor en na de ombouw. Tevens zou de aansluitboog kunstmatig kunnen worden aangepast naar bijvoorbeeld 15 meter. Een onderzoek waarnaar gekeken kan worden is in dit geval dat van Erné (Erné, 1995). Dat onderzoek bekeek in Lelystad de verschillen tussen enkel- en dubbelstrooksrotondes door op een dubbelstrooksrotonde pylonen neer te zetten en er daardoor een enkelstrooksrotonde van te maken.

Een andere manier om een beter beeld te krijgen is om in het buitenland capaciteitsmetingen uit te gaan voeren. Voor dit onderzoek was dat niet mogelijk gezien de beperkte tijd. Er zal dan echter wel moeten worden gekeken of de bevindingen ook voor de Nederlandse situatie kunnen kloppen. In andere landen kunnen de omgevingsfactoren en de bestuurders namelijk anders zijn dan hier.

Om een duidelijker beeld te krijgen van de verkeersveiligheid is het aan te bevelen om onderzoek te doen naar ongevallen op rotondes met verschillende soorten aansluitingen. Het nadeel is ook hier dat er in Nederland te weinig rotondes liggen met schuine aansluitingen om hier een goed beeld van te krijgen. Dit zou ook hier op twee manieren kunnen worden onderzocht. Of door rotondes aan te leggen met grotere aansluitbogen of de verkeersveiligheid van rotondes in het buitenland te bekijken. Er moet dan echter wel in een land worden gemeten waar veel fietsers zijn. Een mogelijkheid zou in dat geval België (Vlaanderen) of eventueel Denemarken (Kopenhagen) zijn.

Uit het onderzoek komt naar voren dat de verkeersveiligheid wellicht iets afneemt wanneer de aansluitingen schuiner zijn. Totdat er meer onderzoek is gedaan is het dan ook aan te bevelen om alleen op rotondes waar zich capaciteitsproblemen voordoen schuinere aansluitingen aan te leggen. Aangezien dit volgens de theorie wel degelijk zin heeft voor de capaciteit lijkt het zeker de moeite waard om eens een rotonde om te bouwen en te kijken wat er werkelijk gebeurt. Het lijkt goed om dit te doen op een rotonde met fietsers uit de voorrang. Dit omdat zo een beter beeld verkregen kan worden van de capaciteit. Tevens is het gevolg van de schuinere aansluitingen dat het aantal ongevallen tussen rotonde- en toeritverkeer toeneemt. Dit is een belangrijke ongevalcategorie bij de fietsers. Wanneer de fietsers voorrang moeten verlenen zal de toename van het aantal ongevallen kleiner zijn.

9. DISCUSSIE

Voor een verdiepingsslag in het onderzoek is ervoor gekozen om de bevindingen aan de hand van stellingen voor te leggen aan verschillende personen die zich in het heden of verleden bezig hebben gehouden met onderzoek naar rotondes. Ook zijn er mensen aangeschreven die ervaring hebben met het ontwerpen van rotondes. Tevens zijn enkele organisaties benaderd die zich bezig houden met rotondes of wegvervoer.

Van de aangeschreven personen/organisaties hebben de volgende gereageerd:

- Aries van Beinum, civiel-technicus, afgestudeerd op turborotondes
- Gerrit Bakkema, verkeerskundige gespecialiseerd in rotondes, ontwerper "Zeewolde"
- John Boender, projectmanager bij het CROW
- Otto van Boggelen, coördinator bij het Fietsberaad
- Theo Bosch, betrokken bij de ombouw van rotondes in jaren '90
- Atze Dijkstra, verbonden aan de SWOV
- Janet Kennedy, verbonden aan TRL, een Engels onderzoeksinstituut
- Martijn de Leeuw, civiel-technicus, afgestudeerd op de capaciteit van rotondes
- Regis Leijts, verkeerskundige, afgestudeerd op wachtrijlengtes voor rotondes
- Leen Rozeboom, betrokken bij het ontwerp van de rotonde in Zeewolde
- Veilig Verkeer Nederland

De verschillende deskundigen kregen elk vier stellingen voorgelegd. Voor de internationale deskundigen zijn de stellingen ook in het Engels vertaald. De stellingen zelf zijn terug te vinden in bijlage 9 (NL) en bijlage 10 (EN). De stellingen gingen over de effecten van schuinere aansluitingen op zowel de capaciteit als de verkeersveiligheid. Tevens was er een stelling over de effecten van de snelheid en was er een stelling over het belang van zichtbaarheid.

Opvallend is, maar niet geheel onverwacht, dat de geschiedenis van de ondervraagden duidelijk een rol speelt in de antwoorden op de vragen. Zo wijzen beide heren die betrokken zijn geweest bij het ontwerp van de rotonde in Zeewolde erop dat juist doordat die rotonde overzichtelijker is er ook veiligheidswinst zou kunnen worden behaald. Eenzelfde reactie is terug te vinden bij de personen die zich meer met fietsers en veiligheid bezighouden. Zo reageerde Dijkstra (SWOV) dat een rotonde alleen wordt aangelegd voor een grotere verkeersveiligheid en dat daardoor capaciteit geen issue is. Ook Van Boggelen (Fietsberaad) benadrukte het belang van verkeersveiligheid en dan specifiek voor fietsers.

9.1.1. Capaciteit

De meeste experts zijn het er over eens dat door schuinere aansluitingen de toeritcapaciteit hoger wordt. Enkele experts noemen of omschrijven ook de winst die te behalen valt door de vermindering van het schijnconflict tussen afrit- en toeritverkeer. Een ander voordeel dat genoemd wordt is het soepeler passeren van grote voertuigen. Wanneer vrachtwagens met een hogere snelheid de rotonde kunnen passeren levert dat een capaciteitswinst op aangezien deze verkeersdeelnemers vaak veel moeite hebben met rotondes. Wanneer dit verminderd wordt kan de tijd die de vrachtwagen nodig heeft voor de passage omlaag gaan en zal de capaciteit omhoog gaan, zo is de gedachte hierachter.

Ook was er een deskundige (De Leeuw) die juist de grootste capaciteitswinst verwachtte bij veel toeritverkeer en weinig rotondeverkeer. De reden dat hij dat opmerkte was dat er bij veel drukte op de rotonde de bocht voor het oprijden geen bottleneck is, maar dat de grote hoeveelheid rotondeverkeer dat is. Hij verwijst echter niet naar het schijnconflict dat minder zou kunnen worden vanwege de grotere afstand tussen af- en toerit. Van Beinum maakt een vergelijkbare opmerking.

Over het antwoord op de vraag of snelheid een belangrijke variabele is voor het bepalen van de capaciteit van de rotonde zijn de deskundigen het redelijk eens. Over het algemeen wordt de

snelheid op de toerit niet als een belangrijk onderdeel van de capaciteit gezien. De snelheid op de rotonde voor de toerit, dus waar de voertuigen moeten gaan invoegen is echter wel van belang. Door een toename van de snelheid op de rotonde wordt het kritische hiaat namelijk groter. Daardoor zullen dus minder hiaten worden gebruikt en zal de capaciteit van de toerit afnemen. Opnieuw komen deze, rake, opmerkingen van de twee aan Fortuijn gelieerde deskundigen. Aangezien ervan wordt uitgegaan dat de rotondediameters niet veranderen (binnen-/buitenstraal en rammelstrook) heeft dit niet veel effect op een rotonde met schuinere aansluitingen. De snelheid op de rotonde neemt namelijk bijna niet toe door de veranderde aansluitingen. De snelheid van vrachtverkeer zou echter wel van invloed kunnen zijn op de capaciteit van de toerit.

9.1.2. Verkeersveiligheid

Alle deskundigen zijn het erover eens dat de snelheid op rotonde en toerit belangrijk is voor de verkeersveiligheid. Een rotonde wordt over het algemeen onveiliger als daarop hogere snelheden worden behaald. Het is wel de vraag hoe groot het snelheidsverschil is wat de concrete gevolgen daarvan zijn.

Op de vraag of de schuinere aansluitingen ook leiden tot grotere verkeersonveiligheid komen wisselende antwoorden naar voren, doch de meeste lijken instemmend. Zo wordt onder andere gewezen op zichthoeken die een probleem zouden vormen. Dit is echter afhankelijk van hoe schuin de aansluiting is. Bij een extreem schuine aansluiting kan het zo zijn dat de spijl in de weg zit, maar er is aangetoond dat het voor de onderzochte rotondes niet veel uitmaakt (paragraaf 7.4).

Wanneer er vrijliggende fietspaden zijn is er volgens Leijs geen groot verschil tussen schuine en rechtere aansluitingen. Dit omdat er toch opzij wordt gekeken door de automobilisten.

Wat wel opvalt is het grote aantal experts dat wijst op de omgevingsfactoren. Dit is iets wat ook al aan de orde is gesteld in het hoofdstuk over verkeersveiligheid. De veiligheid is dus voor een groot deel afhankelijk van de omgeving. Het is dan ook van belang rekening te houden met die omgeving wanneer er rotondes ontworpen worden.

De importantie van de zichtbaarheid van de fietsers wordt door alle experts onderschreven. Belangrijk is dat fietsers op tijd worden gedetecteerd. Daarbij speelt volgens enkelen ook het verwachtingspatroon. Als fietsers worden verwacht en als die consequent voorrang moeten krijgen dan kan er beter geanticipeerd worden.

De experts zijn het echter niet eens over de vraag of zichtbaarheid belangrijker is dan snelheid voor de verkeersveiligheid. Er zijn er die denken dat de zichtbaarheid inderdaad belangrijker is. Opvallend genoeg hebben de meeste experts hier niet echt een argumentatie bij. De deskundigen die denken dat beide belangrijk zijn baseren zich onder andere op de grotere impact/schade bij hogere snelheden en een kleinere kans om te anticiperen (door minder tijd).

Opvallend is dat geen van de experts spreekt van verschillende soorten ongevallen en de verschillende variabelen die daarbij van belang zijn. Zij kijken meer naar het algemene beeld. Het kan zijn dat nu bijvoorbeeld de eenzijdige ongevallen worden vergeten. Ook de ongevallen in de nacht (vaak eenzijdig) worden wellicht vergeten.

REFERENTIES

- Arndt, O.K. (1999). *Road Design Incorporating Two Fundamental Safety Parameters*, Queensland Department of Main Roads. In: Proceedings of the 2nd Road Safety Research, Policing and Education Conference, University House, Canberra, Australië, 28-30 November 1999, p. 761-781
- Arndt, O.K. (2001). *Geometric design of roundabouts for optimum safety: Use of the software program 'ARNDT'*. Queensland Department of Main Roads. In: Managing your transport assets : proceedings of the 20th ARRB Conference, Melbourne, Australië, 19-21 March 2001
- Bakker, J.W. (1983). *Het functioneren van de rotondes Heerenveen en Joure*. Verkeerskunde, jaargang 34 (1983) nummer 2
- Beinum A.S. van (2007). *Prestatieanalyse van de Turborotonde*, Afstudeerrapport, Witteveen+Bos, TU Delft, Den Haag
- Bekkernens, G. & Boender, J (2004). *Aanbevolen maatvoering voor rotondes wordt te veel als standaard gezien*, Wegen nummer 8 pagina 10-12, september 2004
- Bekkernens, G. (2005). *Nederland toe aan nieuwe generatie rotondes*, Transport en Logistiek Aflevering 1 pagina 32-33, 13 januari 2005
- Bovy, P.H. (1991). *Zusammenfassung des schweizerischen Kreiselhandbuchs*, Strasse und Verkehr, 3, 1991, p. 129-139
- Brilon, W. (1988). *Leistungsfähigkeit von Kreisverkehrsplätzen: Ein Zwischenbericht*, Straßenverkehrstechnik, Heft 5, 1988, p. 167-175
- Brilon, W. & Stuwe, B. (1992). *Roundabouts in Germany, recent results regarding capacity and safety*, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Duitsland, In: Giratoires 92 : actes du séminaire international, Nantes, France, 14, 15, 16 Octobre 1992, p. 41-51
- Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeers-techniek [CROW] publicatie 126 (1998), *Eenheid in Rotondes*, CROW, Ede
- CROW (2004), *ASVV 2004: Aanbevelingen voor verkeersvoorzieningen binnen de bebouwde kom*, CROW, Ede
- Daniels, S., Wets, G. (2006). *Invloed van rotondes op verkeersveiligheid: Overzicht van onderzoeksresultaten en internationale richtlijnen voor ontwerp*, Universiteit Hasselt, Hasselt (België)
- Davies, D.G., Taylor, M.C., Ryley, T.J. & Halliday, M.E. (1997). *Cyclists at roundabouts – the effect of 'Continental' style design on predicted safety and capacity*, TRL report 285, Verenigd Koninkrijk
- Dienst Verkeerskunde (1990). *Vergelijkend onderzoek programmatuur voor capaciteitsberekeningen voor kruispunten en verkeerspleinen, Deelrapport: 2 Verkeerspleinen (voorrangsronden)*, Rijkswaterstaat
- Erné, K.J.B. (1995). *Meer verkeer over de rotonde*, Verkeerskunde, nummer 11, 1995, p. 40-44

Guichet, B. (1992). *Typologie des accidents dans les giratoires urbains*. Centre d'Etudes Technique de l'Equipement de l'Ouest, Nantes, Frankrijk, In: Giratoires 92 : actes du séminaire international, Nantes, France, 14, 15, 16 Octobre 1992, p. 145-151

Jørgensen, N. O. (1990). *Roundabouts – Flow improvement or speed reduction?*, Technical University of Denmark, Lyngby-Taarbæk, Denemarken, In: Traffic management and road safety : proceedings of seminar G (P334) held at the 18th PTRC European Transport and Planning Summer Annual Meeting, University of Sussex, England, September 10-14, 1990, p. 237-245

Lawton, B.J., Webb, P.J., Wall G.T. & Davies D.T. (2003). *Cyclists at 'continental' style roundabouts: report on four trial sites*, TRL Limited, Wokingham, Verenigd Koninkrijk

Laya, O. (1988). *Visual perception at roundabouts: Multiple levels of the task's complexity*, Laboratoire de Psychologie, Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, Montlhéry (Frankrijk)

Leeuw, A.M. de (1997). *Capaciteit van rotondes: ontwikkeling van nieuwe rekenmodellen*, afstudeerverslag, Goudappel Coffeng, TU Delft, Deventer

Leeuw, A.M. de, Tutert, S.I.A. & Willems, G. (1999), *Rekenen aan rotondes, invloed fietsers op doorstroming beperkt*, Verkeerskunde, nummer 11, 1999, p. 20-23

Maycock, G. & Hall, R.D. (1984). *Accidents at 4-arm roundabouts*, Transport and road research laboratory report 1120, Wokingham, Verenigd Koninkrijk

Minnen, J. van (1988). *Rotondes II: Inventarisatie en analyse van de beschikbare informatie*, SWOV, Leidschendam

Minnen, J. van (1990). *Roundabouts – Save for cyclists too?*, SWOV, Leidschendam, In: Traffic management and road safety : proceedings of seminar G (P334) held at the 18th PTRC European Transport and Planning Summer Annual Meeting, University of Sussex, England, September 10-14, 1990, p. 247-258

Robinson, B.W. (2000), *Roundabouts: An Informational Guide*, Kittelson & Associates, Inc., Federal Highway Administration, Portland, Oregon

Semmens, M.C. (1985). *ARCADY2: An enhanced program to model capacities, queues and delays at roundabouts*, TRRL Research Report 35, Verenigd Koninkrijk

Weijermars, W.A.M. (2001). *Vorrang aan veiligheid op rotondes*, Afstudeerscriptie, Universiteit Twente, Enschede

DEFINITIELIJST

Afrijcapaciteit	De capaciteit die de toerit heeft op het moment dat er geen conflicterend rotonde- en afritverkeer aanwezig is. Het verkeer op de toerit kan dan dus ongehinderd de rotonde oprijden.
Afritverkeer	Het verkeer dat afslaat op dezelfde arm als de toerit waarvan de capaciteit wordt gemeten. Dit verkeer heeft een schijnconflict met het toeritverkeer.
Minirotonde	Kleine rotonde met meestal een overrijdbaar middeneiland.
Objectieve verkeersveiligheid	Verkeersveiligheid op basis van cijfers/feiten.
Personenauto equivalent	Getal dat aangeeft wat het vergelijkbare aantal personenauto's van andere voertuigen (bijvoorbeeld een vrachtauto of een fiets) is.
Rammelstrook	Overrijdbare strook langs het middeneiland die bedoelt is om grote voertuigen de rotonde soepeler te laten berijden.
Rotondeverkeer	Het verkeer dat op de rotonde rijdt en waaraan voorrang moet worden verleend bij een toerit. Dit verkeer heeft een conflict met het toeritverkeer.
Subjectieve verkeersveiligheid	Verkeersveiligheid op basis van meningen van bestuurders. Ook wel gevoel van verkeersveiligheid.
Toeritverkeer	Het verkeer op de toerit van de rotonde.
Theoretische afrijcapaciteit	Capaciteit aan de hand van voertuigvolgtijden van groepen voertuigen die de rotonde oprijden zonder gehinderd te worden door rotondeverkeer.
Voertuigvolgafstand	De afstand tussen de achterbumpers van twee voertuigen.
Voertuigvolgtijd	De tijd tussen het passeren van de achterbumpers van twee voertuigen.

GEBRUIKTE AFKORTINGEN

CROW	Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek
FHWA	Federal Highway Administration, de Amerikaanse (hoofd)wegenbeheerder
pae	Personenauto equivalent
SWOV	Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid
TRL	Transport Research Laboratory (Verenigd Koninkrijk)

BIJLAGEN

INHOUDSOPGAVE

10. BIJLAGE 1 MODELLEN	51
1.1. Capaciteit	51
1.1.1. De formule van Bovy	51
1.1.2. Formule van Brilon	53
1.1.3. ARCADY2	54
1.2. Snelheid	55
1.3. Slachtoffers	57
1.3.1. Maycock & Hall	57
1.3.2. Arndt	58
11. BIJLAGE 2 METING ZEEWOLDE	59
12. BIJLAGE 3 METING ENSCHEDE	62
13. BIJLAGE 4 STATISTIEK	65
14. BIJLAGE 5 BEREKENING ARCADY2	66
14.1. Afleiding relatie	66
14.2. Aansluitbogen en -hoeken	66
14.3. Berekening	67
15. BIJLAGE 6 BEREKENING BOVY	68
15.1. Enschede	68
15.2. Zeewolde	69
16. BIJLAGE 7 TAAKANALYSE	70
16.1. Definiëring deeltaken	70
16.2. Uitwerking deeltaken	72
17. BIJLAGE 8 ZICHTBAARHEID	74
18. BIJLAGE 9 STELLINGEN	77
19. BIJLAGE 10 PROPOSITIONS	78

10. BIJLAGE 1 MODELLEN

De twee gebruikelijke modellen in Nederland zijn die van Bovy en Brilon (CROW, 1998). Hieronder zullen deze worden beschreven. Ook wordt gekeken naar andere formules om de capaciteit te berekenen.

10.1. Capaciteit

Er zijn verschillende soorten verkeersmodellen. Er zijn verkeersstroommodellen en hiaatacceptatiemodellen. De in dit onderzoek gebruikte modellen zijn allen verkeersstroommodellen. Dat soort modellen gaat er vanuit dat de capaciteit van de toeritten (in personenauto-equivalent, pae) afhankelijk is van de intensiteit op de rotonde zelf. Dit klinkt logisch omdat hoe meer auto's op de rotonde rijden hoe minder kans er is om de rotonde op te rijden. Het basisconcept is dan ook dat er een bepaalde maximale capaciteit is van de toerit en dat de capaciteit afneemt bij een grotere intensiteit op de rotonde. In formulevorm:

$$C_T = C_0 - \alpha \cdot I_R \quad (\text{B1.1})$$

Hierbij geldt:

C_T = Capaciteit van de toerit [pae/uur]

C_0 = Capaciteit zonder hinder (afrijcapaciteit) [pae/uur]

α = Parameter voor invloed van intensiteit op de capaciteit [-]

I_R = Intensiteit op de rotonde in het conflictvlak met de toerit [pae/uur]

Dit is een vrij simpele formule. Het is echter zo dat voor verschillende rotondes verschillende parameterwaarden gelden en dat ook de maximum capaciteit niet op elke rotonde gelijk is. Ook is het goed mogelijk dat er geen louter lineaire relatie bestaat tussen capaciteit en intensiteit, hetgeen wel uit de formule blijkt. Om deze problemen op te lossen zijn er verschillende formules ontwikkeld. In Nederland worden de formules van Bovy en Brilon gebruikt.

10.1.1. De formule van Bovy

Philippe Bovy heeft bekeken hoe formule B1.1 aan moet worden gepast voor de Zwitserse verkeerssituatie. Hij is daarbij uitgegaan van een standaard rotonde waarbij de capaciteit 1500 personenauto-equivalent is. Afhankelijk van de vormgeving van de van de rotonde zijn de parameters anders. Belangrijk is dat er bij de formule van Bovy ook rekening wordt gehouden met de voertuigen die afslaan op dezelfde tak als de toerit waarvan de capaciteit wordt berekend. De voertuigen die afslaan zijn feitelijk niet in conflict met de voertuigen die de rotonde willen oprijden, maar ze kunnen wel de capaciteit negatief beïnvloeden. Zo kan het bijvoorbeeld zijn dat door het niet gebruiken van de richtingaanwijzer een bestuurder van een voertuig wacht terwijl hij eigenlijk de rotonde had kunnen betreden. Ook een kleinere afstand tussen af- en toerit kan leiden tot een verminderde capaciteit omdat dan pas later kan worden ingeschat of er een hiaat komt om de rotonde op te rijden. Van het afslaand verkeer wordt dan ook gezegd dat het een schijnconflict heeft met het verkeer dat de rotonde op wil rijden.

De formule van Bovy:

$$C_T = \frac{1}{\gamma} \left[1500 - \frac{8}{9} (\beta \cdot I_R - \alpha \cdot I_A) \right] \quad (\text{B1.2})$$

Hierbij geldt:

C_T = Capaciteit toerit [pae/uur]

I_R = Intensiteit rotondeverkeer [pae/uur]

I_A = Intensiteit afslaand verkeer [pae/uur]

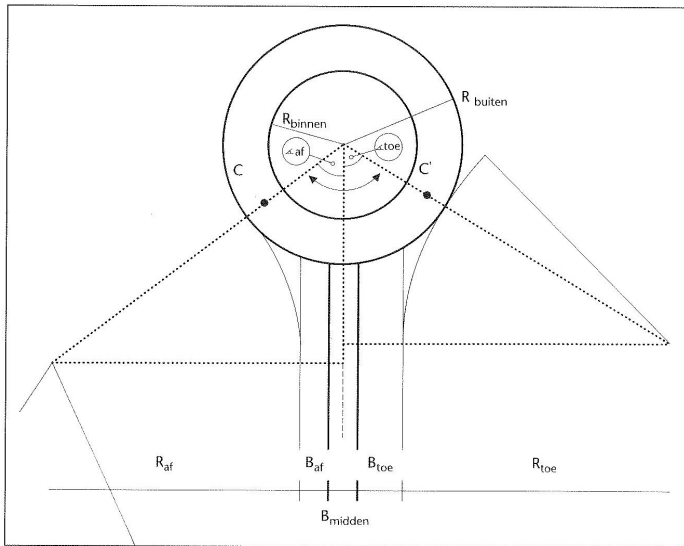
α = Invloed afslaand verkeer [-]

β = Invloed aantal rijstroken op de rotonde [-]

γ = Invloed aantal stroken op de toerit [-]

Aangezien alleen gekeken wordt naar enkelstrooksrotondes met enkelstrooks toeritten worden de gamma (γ) en de bèta (β) constante waarden. De verschillen in capaciteit zijn dan dus alleen nog maar te vinden in de parameterwaarde van het schijnconflict. Bij verschillende metingen is gebleken dat die 1500 voor Nederland wel ongeveer klopt.

De alfa (α) wordt bij de formule van Bovy bepaald aan de hand van de weg die zou moeten worden afgelegd van het begin van de afrit tot het einde van de toerit. Hieronder is te zien over welk deel van de rotonde dit gaat (figuur B1.1).



Figuur B1,1 Afstand C-C'

Hierbij is:

- R_{binnen} = Binnenstraal rotonde [m]
- R_{buiten} = Buitenstraal rotonde [m]
- R_{af} = Straal aansluitboog afrit [m]
- R_{toe} = Straal aansluitboog toerit [m]
- B_{af} = Breedte afrit [m]
- B_{toe} = Breedte toerit [m]
- B_{midden} = Breedte middengeleider [m]

De afstand C-C' is als volgt te berekenen:

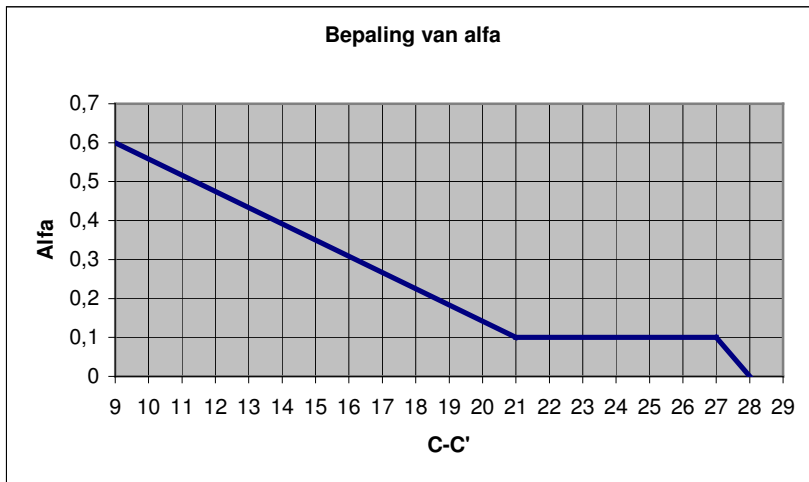
$$C - C' = R_{C-C'} \cdot (\angle_{af} + \angle_{toe})$$

$$R_{C-C'} = \frac{R_{binnen} + R_{buiten}}{2}$$

$$\angle_{af} (rad) = \arcsin \left(\frac{R_{af} + B_{af} + 0,5 \cdot B_{midden}}{R_{buiten} + R_{af}} \right)$$

$$\angle_{toe} (rad) = \arcsin \left(\frac{R_{toe} + B_{toe} + 0,5 \cdot B_{midden}}{R_{buiten} + R_{toe}} \right)$$

Vervolgens is, afhankelijk van het soort verkeer dat over de rotonde rijdt, de alfa te bepalen. Dat kan met behulp van figuur B1.2 op de volgende pagina.



Figuur B1.2 *Bepaling van alfa met behulp van C-C'*

10.1.2. Formule van Brilon

Werner Brilon heeft hetzelfde gedaan als Bovy, maar dan voor de Duitse verkeerssituatie. Overigens is de formule die hij als leidraad gebruikt niet van hemzelf afkomstig, maar van Siegloch. Hij houdt echter geen rekening met het schijnconflict. Wat ook afwijkt is het verband tussen intensiteit en capaciteit in de formule. Zo is in plaats van een lineair verband sprake van een exponentieel verband. Dat wil dus zeggen dat de eerste voertuigen die op de rotonde komen tot een vrij grote capaciteitsdaling leiden en de laatste voertuigen een kleinere impact hebben op de capaciteit.

De formule van Brilon:

$$C_T = C_0 \cdot e^{-\frac{B}{10000} I_R} \quad (\text{B1.3})$$

Hierbij is:

- C_T = Capaciteit toerit [pae/uur]
- C_0 = Capaciteit zonder hinder (afrijcapaciteit) [pae/uur]
- I_R = Intensiteit rotondeverkeer [pae/uur]
- B = Invloed rotondeverkeer [-]

Om hierbij rekening te houden met verschillen tussen de soorten rotondes zal er iets moeten worden aangepast in parameter B.

10.1.3. ARCADY2

In het model ARCADY2 (Semmens, 1985, beschreven door: Dienst Verkeerskunde, 1990) wordt een model gebruikt om de capaciteit van een toerit te berekenen. Dit is een Brits model en is dan ook voornamelijk samengesteld op basis van tangentiaal aangesloten rotondes. Het uitgangspunt is opnieuw formule B1.1.

De formules gebruikt in ARCADY2:

$$Q_e = F - f_c \cdot Q_c$$

$$F = 303 \cdot x_2 \cdot k$$

$$f_c = 0,21 \cdot t_D \cdot k(1 + 0,2 \cdot x_2)$$

$$k = 1 - 0,00347(\Phi - 30) - 0,978\left(\frac{1}{r} - 0,05\right)$$

$$t_D = 1 + \frac{0,5}{1 + \exp\left(\frac{D - 60}{10}\right)}$$

$$x_2 = v + \frac{e - v}{1 + 2 \cdot S}$$

$$S = 1,6 \frac{e - v}{l'}$$

Hierbij is:

Q_e = Capaciteit toerit [pae/uur]

Q_c = Intensiteit rotondeverkeer [pae/uur]

v = Halve breedte toeleidende rijbaan [m]

e = Breedte toerit ter hoogte van de rotonde [m]

Φ = Aansluithoek toerit [°]

r = Straal aansluitboog toerit [m]

l' = Flare, lengte waarover verbreding van de toerit plaatsvindt [m]

D = Buitendiameter rotonde [m]

Bij deze formule is met behoorlijk wat geometrische elementen rekening gehouden. En ook, opvallend genoeg, met veel andere elementen dan in de andere twee formules. Aangezien alleen rekening wordt gehouden met het rotondeverkeer wordt in dit geval het schijnconflict niet meegenomen.

10.2. Snelheid

Het CROW gebruikt een formule om de snelheid op een rotonde te bepalen. Die formule ziet er als volgt uit:

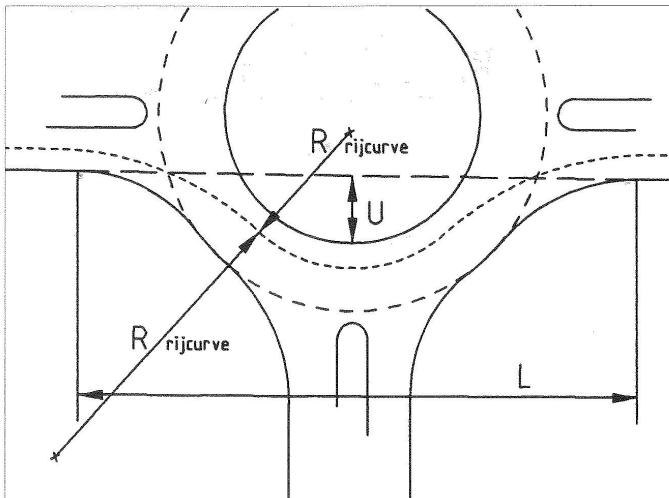
$$V = 7,4 \cdot \sqrt{R_{\text{rijcurve}}} \quad (\text{B1.4})$$

Hierbij is:

V = Snelheid [km/uur]

R_{rijcurve} = Straal van de rijcurve [meter]

De R is weer afhankelijk van de afstand tussen tegenover elkaar liggende toe- en afritten en de afwijking ten opzichte van een rechtdoorgaande beweging (figuur B1.3).



Figuur B1.3 Afwijking ten opzichte van rechtdoorgaande beweging

De formule:

$$R_{\text{rijcurve}} = \frac{(0,25 \cdot L)^2 + (0,50 \cdot (U + 2))^2}{U + 2} \quad (\text{B1.5})$$

Hierbij is:

L = Afstand tussen toe- en afrit [meter]

U = Afwijking van rechte lijn [meter]

Het is echter de vraag of de formule ook geldig is voor een rotonde met een schuine aansluiting. Dit zou kunnen worden getoetst door de rotonde in Zeewolde te berijden en de snelheid te meten.

Een groot nadeel van bovenstaande formule is dat er alleen gekeken wordt naar de gemiddelde snelheid op de rotonde en alleen naar de rechtdoorgaande beweging. Het zou goed kunnen zijn dat bijvoorbeeld op de rotonde zelf met een lage snelheid gereden wordt (kleine binnenstraal) terwijl de afrit met hoge snelheid genomen wordt. Hierdoor kan dus op het punt waar de fietsers rijden sprake zijn van hoge snelheden terwijl de gemiddelde snelheid laag is. Dit is specifiek gevaarlijk voor fietsers en beïnvloedt de verkeersveiligheid negatief. Tevens kan het zo zijn dat de rechtsafslaanende beweging dermate vloeiend kan gaan dat daar de snelheden substantieel hoger liggen dan bij de rechtdoorgaande beweging, dit is vaak het geval indien de hoek tussen de twee takken groter dan 90 graden is. Ook dit brengt extra verkeersonveiligheid met zich mee.

Om deze problemen op te lossen gebruikt de Federal Highway Administration (FHWA) van de Verenigde Staten een snelheidberekeningsmethode op basis van “vehicle paths” oftewel het afgelegde traject van een voertuig (Robinson, 2000). Er wordt bij alle mogelijke, meest kritische, trajecten gekeken naar de snelheden. Zo wordt er bijvoorbeeld bij een rechtdoorgaande beweging gekeken naar de snelheid op de toerit, op de afrit en op de rotonde zelf. Dit gaat op basis van een formule die lijkt op de formule van het CROW.

De FHWA formule is:

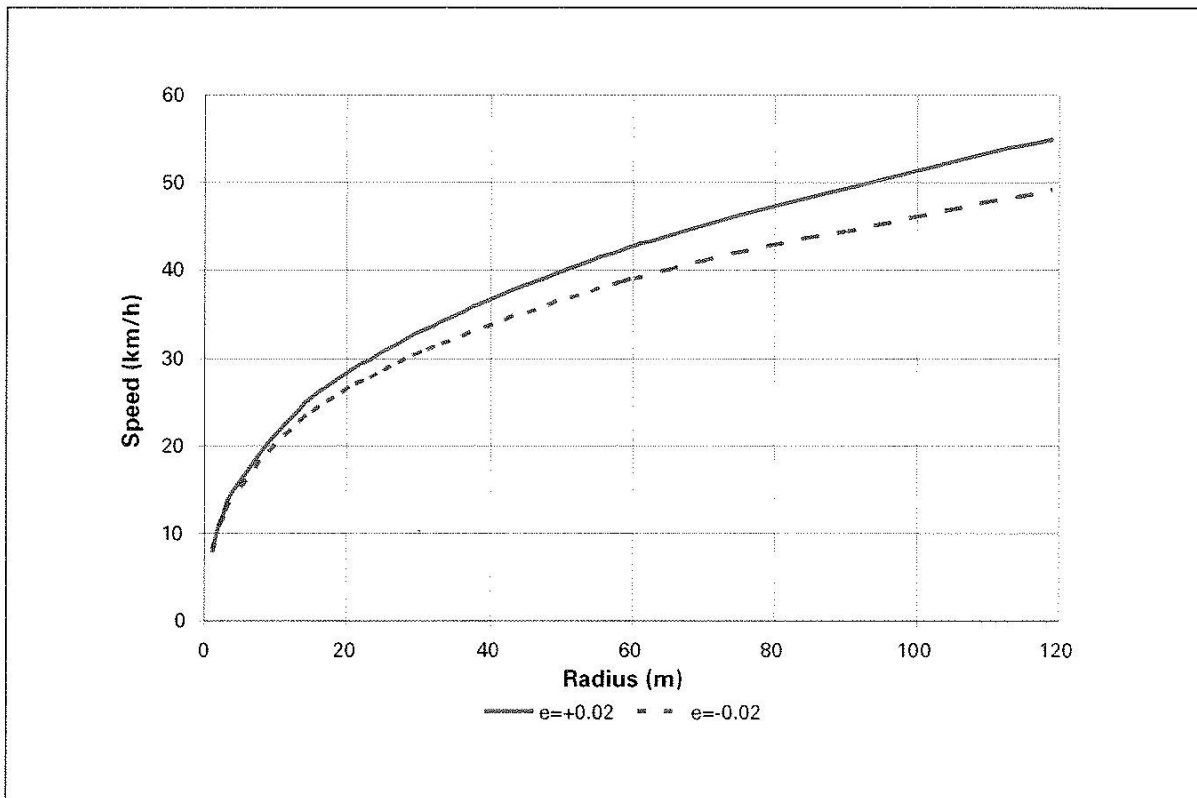
$$V = \sqrt{127R(e + f)} \quad (\text{B1.6})$$

Daarbij is:

- V = Snelheid [km/uur]
- R = Straal van de rijcurve [meter]
- e = Alignement breedterichting [m/m]
- f = Fricatiefactor [-]

Het alignement is over het algemeen +0,02 bij de toe- en afrit en -0,02 op de rotonde zelf. De frictiefactor is afhankelijk van de snelheid en wordt kleiner naarmate de snelheid toeneemt. Dat wil dus zeggen dat bij een oplopende straal de grafiek wordt afgevlakt.

De grafiek waarmee is te bepalen welke snelheid bij welke straal hoort is weergegeven in figuur B1.4.



Figuur B1.4 Straal traject en snelheid op dat traject (Robinson, 2000)

Met behulp van deze grafiek kan de snelheid worden afgelezen wanneer de straal van het traject is bepaald. Zo hoort bij een traject met een straal van 40 meter een snelheid van tussen de 34 en 37 kilometer per uur. Voor de Amerikaanse situatie wordt dus aangenomen dat de 34 km/uur geldt voor een traject met deze straal op de rotonde zelf en 37 km/uur op een toe- of afrit.

10.3. Slachtoffers

Verschillende onderzoekers hebben onderzoek gedaan naar formules waarmee, aan de hand van de geometrie van een rotonde, kan worden bepaald hoeveel ongevallen er gemiddeld op een rotonde plaatsvinden. Hieronder zullen de gevonden formules of de aangetoonde relaties worden bekeken.

10.3.1. Maycock & Hall

In het onderzoek van Maycock en Hall (1984) wordt gekeken naar de gevolgen van verschillende vormgevingsaspecten op het aantal letselongevallen op rotondes. Daarin worden allereerst verschillende soorten ongevallen onderscheiden, te weten: ongevallen tussen rotondeverkeer en toeritverkeer, ongevallen op en voor de toerit, eenzijdige ongevallen, voetgangersongevallen en overige ongevallen.

Maycock en Hall gaan uit van een exponentiële functie zoals hieronder te zien is:

$$A = k \cdot Q_e^\alpha \cdot Q_r^\beta \cdot \exp \sum [b_i \cdot G_i] \quad (B1.7)$$

Hierbij is:

- A = Het aantal ongevallen per jaar per toerit [-]
- k = Parameter voor omrekening naar ongevallen [-]
- Q_e = Intensiteit toeritverkeer [1000 pae/24 uur]
- Q_r = Intensiteit rotondeverkeer [1000 pae/24 uur]
- α = Parameter voor toeritverkeer [-]
- β = Parameter voor rotondeverkeer [-]
- b_i = Parameter voor vormgevingsaspect [-]
- G_i = Waarde vormgevingsaspect [m^0 /ratio]

De formule geeft dus een exponentieel verband aan tussen de vormgevingsaspecten en het aantal ongevallen. De parameters α en β zijn door de onderzoekers bepaald met behulp van algemene formules, dus zonder de geometrie van de rotonde mee te nemen. Belangrijk is dat de intensiteitsfunctie van het rotondeverkeer alleen wordt meegenomen bij ongevallen tussen toeritverkeer en rotondeverkeer. In de andere gevallen verdwijnt de term van het rotondeverkeer dus. In de onderstaande tabel staan de verschillende parameterwaarden b van de verschillende ongeval-typen.

Type ongeval	Variabele ¹⁰	b_i ¹¹
Toerit - rotondeverkeer	Rijcurve bij oprijden (1/R, m)	-40,3
Ongevallen op toerit	Rijcurve bij oprijden (1/R, m)	20,7
Eenzijdige ongevallen	Rijcurve bij oprijden (1/R, m)	23,7
Overige	Geen	-
Voetgangers	Geen	-

Tabel B1.1 Parameterwaarden bij Maycock & Hall

Met behulp van deze cijfers kan inzicht worden verkregen in het te verwachten aantal ongevallen op verschillende rotondes.

¹⁰ Bij de meeste soorten ongevallen zijn er variabelen die eveneens statistisch significant zijn (bij 5 procent onzekerheid). Bij de ongevallen tussen rotondeverkeer en toeritverkeer zijn dat bijvoorbeeld: "toeritverkeer", "rotondeverkeer", "breedte toerit", "zichtafstand", "Percentage motoren" en "Gradiënt categorie". Deze worden niet meegenomen aangezien dit geometrische variabelen zijn die bij de twee onderzochte typen rotonden gelijk zijn. Het is bijvoorbeeld niet van belang wat de invloed is van meer toerit- en rotondeverkeer.

¹¹ Bron: Maycock & Hall (1984) pagina 21

10.3.2. Arndt

Net zoals Maycock & Hall heeft ook Arndt (1999) onderzocht wat de geometrische aspecten voor gevolgen hebben qua verkeersveiligheid. Een belangrijk verschil is dat Arndt voornamelijk gebruik maakt van verschillen in snelheden. Een ander verschil is dat hij geen exponentieel, maar een kwadratisch verband legt tussen snelheid en ongevallen. Wat Arndt wel net als Maycock & Hall doet is het onderscheiden van verschillende soorten ongevallen. De typen zijn vergelijkbaar maar er zijn wel een aantal soorten aan toegevoegd. Zo zijn er ook ongevallen bij het verlaten van de rotonde en bij het invoegen na een rotonde. Aangezien deze ongevallen alleen op meerstrooks rotondes voorkomen zijn die niet van belang voor dit onderzoek. Voetgangersongevallen worden overigens niet besproken door Arndt.

Arndt gaat uit van de volgende basisformule:

$$A = k \cdot Q_e^\alpha \cdot G_i^{b_i} \quad (\text{B1.8})$$

Hierbij is:

- A = Het aantal ongevallen per jaar per toerit [-]
- k = Parameter voor het omrekening naar ongevallen [-]
- Q_e = Intensiteitsfunctie toerit [combinatie van elementen van de stroom]
- α = Parameter voor toeritverkeer [-]
- b_i = Parameter voor vormgevingsaspect [-]
- G_i = Waarde vormgevingsaspect [m^9/ratio]

De formule geeft dus een kwadratisch verband aan tussen de vormgevingsaspecten en het aantal ongevallen. De parameters k, α en b_i zijn voor alle soorten ongevallen bepaald met behulp van ongevaldata van rotondes in Queensland, Australië. In de onderstaande tabel staan de verschillende parameterwaarden b van de verschillende ongevaltypen.

Type ongeval	Variabele	b_i^{12}
Toerit - rotondeverkeer	Potentiële relatieve snelheid (km/uur)	1,38
Ongevallen op toerit	Snelheid op toerit (km/uur)	4,77
Eenzijdige ongevallen	Rijcurve bij oprijden (R, m)	1,91 ¹³
Overige	Geen	-

Tabel B1.2 Parameterwaarden bij Arndt

Bij de eenzijdige ongevallen wordt rekening gehouden met de snelheid op het element samen met het verschil in snelheid voor het element (De G_i is dan dus Snelheid + Snelheidsvermindering). Er wordt vanuit gegaan dat vóór de verschillende rotondes de snelheid gelijk is. Het maakt dan dus ook niet uit in wat de snelheid op de toerit is aangezien die snelheid samen met de vermindering in snelheid altijd 50 km/uur is (binnen de bebouwde kom). Deze variabele wordt dan ook niet meegenomen in het onderzoek. De vraag is echter of dit feitelijk juist is aangezien zo geen rekening wordt gehouden met verschillen in snelheid voor eenzijdige ongevallen.

¹² Bron: Arndt (1999) pagina 3-5

¹³ Het aantal ongevallen wordt gedeeld door de uitkomst van deze factor, niet vermenigvuldigd zoals bij de andere termen.

11. BIJLAGE 2 METING ZEEWOLDE

Metingslocatie: Zeewolde
Metingsdatum: 22-05-2008
Dag: Donderdag
Weersgesteldheid: Hier en daar bewolkt
Meetperiode: 7.00-9.00 uur

Vormgeving rotonde:

Binnenstraal: 11,75 m
Buitenstraal: 17 m
Breedte rammelstrook: 2,75 m
Aansluitboog toerit: 15 m
Aansluitboog afrit: 18 m
Breedte toerit: 3,7 m
Breedte afrit: 4,2 m
Breedte middengeleider: 6 m



Figuur B2.1 De betreffende rotonde op een luchtfoto (Bron: Live Maps)



Figuur B2.2 De schuine aansluiting

Gehoopt was om een capaciteitsmeting uit te kunnen voeren voor de rotonde Gelderseweg-Kwartiermakerslaan te Zeewolde. Hiervoor is het echter wel noodzakelijk dat er een dusdanig verkeersaanbod is dat er wachtrijen ontstaan. Bij aankomst blijkt dat op de kruising tussen de Kwartiermakerslaan en de Zeewolderdijk een vergelijkbare rotonde ligt. Er is dan ook een aantal metingen op de andere rotonde uitgevoerd. Helaas bleek al snel dat de intensiteiten van de ver-

schillende verkeersstromen niet genoeg zouden zijn voor een capaciteitsmeting. Als alternatief is van een aantal groepen voertuigen (vaak alleen lichte voertuigen) die vlak achter elkaar reden gemeten wat de gemiddelde voertuigvolgtijd was bij het oprijden van de rotonde. Het gaat hierbij om de tijd tussen de achterkant van het eerste en het laatste voertuig. Het aantal volgtijden is dan ook één minder dan het aantal voertuigen in de rij.

Ook is er nog enkele malen over de rotondes gereden om te kijken met welke snelheden de rotondes gepasseerd konden worden. In de volgende tabel staan deze (niet erg exacte) waarden in km/uur.

locatie	Rechtsaf	Rechtdoor	Linksaf
Toerit	38	35	32
Rotonde	-	32	30
Afrit	45	40	40

De rotondes zijn ook geobserveerd en er zijn een aantal dingen opgevallen te weten:

- Allereerst valt op dat grote voertuigen redelijk soepel de rotondes kunnen overrijden. Zo is er een gelede bus gezien die met gemak en een hoge snelheid omkeerde op de rotonde (dus de gehele rotonde rond).
- Wel zijn er enkele bussen die moeite hebben met het linksaf slaan op de rotonde. Er is dan ook te zien dat een klein gedeelte van de overrijdbare strook bereden wordt. Er wordt echter slechts een aantal centimeter van de strook gebruikt.
- Tijdens de aanwezigheid is er een bijna-ongeluk geweest tussen een fietser en een auto. Het ging om een fietser die met de klok mee over de rotonde reed. Op de rotonde is dat dan ook geoorloofd. Dit terwijl verschillende onderzoeken al hebben aangetoond dat het onverstandig is om fietsen in beide richtingen toe te staan. Uit de geobserveerde situatie blijkt dan ook dat dit niet aan te bevelen is in het kader van de verkeersveiligheid.

Overige rotondes rondom Zeewolde

Nadat de metingen waren uitgevoerd is ook nog een aantal andere rotondes rondom Zeewolde bezocht. Hieronder een korte beschrijving van die rotondes:



Figuur B2.3 De bekeken rotondes, rood = rechte aansluiting, blauw = schuin

Rotonde Spiekweg-Gelderseweg (Bedrijventerrein Trekkersveld)

De rotonde ligt aan de rand van het bedrijventerrein Trekkersveld alwaar veel grote vrachtauto's rijden. Daarmee is hoogstwaarschijnlijk rekening gehouden want de rijbaan op de rotonde is vrij breed en de af- en toerit liggen vrij ver uit elkaar waardoor de rotonde gemakkelijker te nemen is voor vrachtwagens. Ook is de diameter van de rotonde vrij groot. Er is dan ook te zien dat de rotonde over het algemeen vrij soepel wordt bereden.

Nieuwe rotondes Spiekweg

Op de kruispunten met de Horsterweg en de Ossenkampseweg/Groenewoudseweg van de Spiekweg zijn de laatste jaren twee rotondes aangelegd. De twee rotondes zijn vergelijkbaar en worden dan ook tezamen besproken. Wat opvalt is dat hier ook de kleinste vrachtwagen al gebruik maakt van het (kleine) overrijdbare gedeelte van de rotonde wanneer dat voertuig linksaf slaat. Dit zou kunnen komen doordat de rijstrook smaller is.

Metingen

Metingnummer	# Volgtijden	Tijd (s)	Volgtijd (s)	Opmerkingen
1	3	7,57	2,52	
2	2	7,03	3,52	3e verder weg
3	3	7,57	2,52	
4	4	8,5	2,13	Achter Bus
5	2	4,31	2,16	
6	8	16,63	2,08	
7	4	8,78	2,20	
8	3	5,5	1,83	
9	3	7,13	2,38	incl 1 rotondevoertuig
10	5	8,19	1,64	
11	7	15,68	2,24	
12	5	11,37	2,27	Niet heel dicht op elkaar
13	4	6,94	1,74	
14	3	5,53	1,84	
15	2	4,07	2,04	
16	2	4,43	2,22	
17	3	6,56	2,19	Ruimte over
18	4	6,65	1,66	
19	3	6,38	2,13	Laatste kan dichter
20	3	6,18	2,06	
21	2	3,69	1,85	
22	2	4,03	2,02	
23	3	6,94	2,31	Ruimte
24	4	8,47	2,12	Bijna vanuit stilstand
25	8	18,06	2,26	incl 1 rotondevoertuig
26	4	10,15	2,54	Incl kleine vrachtwagen
27	3	5,97	1,99	
28	4	8,34	2,09	
29	4	9,4	2,35	1 rot.vtg. en 2 kl. vrachtw.
30	2	3,72	1,86	
31	2	3,69	1,85	

12. BIJLAGE 3 METING ENSCHEDE

Metingslocatie: Enschede
Metingsdatum: 03-06-2008
Dag: Dinsdag
Weersgesteldheid: bewolkt, af en toe lichte regen
Meetperiode: 7.00-9.00 uur

Vormgeving rotonde:

Binnenstraal: 10 m
Buitenstraal: 15,75 m
Breedte rammelstrook: 3 m
Aansluitboog toerit: 12 m
Aansluitboog afrit: 15 m
Breedte toerit: 3,31 m
Breedte afrit: 3,73 m
Breedte middengeleider: 2 m



Figuur B3.1 De betreffende rotonde op een luchtfoto (Bron: Live Maps)

Na de metingen in Zeewolde was het nodig om de theoretische toeritcapaciteit ook te meten op een rotonde met rechte aansluitingen. In navolging van Zeewolde zijn ook hier metingen uitgevoerd naar de voertuigvolgtijden op de toerit.

Op de rotonde is ook geobserveerd en er zijn een aantal dingen opgevallen te weten:

- Wat opvalt is dat veel bestuurders moeite hebben om de rotonde op te komen. Dat wil zeggen dat vaak een hiaat niet benut wordt. Dit komt deels door het schijnconflict met de afrit.
- Tevens valt het hoge aantal fietsers op. Vooral in de tijdsperiode 7.45-8.30 uur rijden er erg veel fietsers. Omdat de fietsers in de voorrang worden afgewikkeld levert dit behoorlijk wat reistijdverlies op voor motorvoertuigen die de fietsers voorrang moeten geven. Doordat dit dikwijls tot opstoppen leidde tot dicht bij/op de toerit werd het meten bemoeilijkt.
- Wat ook opvalt is dat veel kleine voertuigen (onnodig) de rammelstrook gebruiken. Dit is deels omdat ze anders zouden moeten wachten op afslaande voertuigen die een fietser voorrang geven en deels om minder te hoeven uitwijken van de rechtdoorgaande lijn.
- Het middeneiland, en de beplanting daarop, is een stuk hoger dan dat in Zeewolde. Ook staat er een groot kunstwerk op de rotonde waardoor niet goed naar de overkant van de rotonde gekeken kan worden.

Metingen

Metingnummer	# Volgtijden	Tijd (s)	Volgtijd (s)	Opmerkingen
1	2	5,78	2,89	2e gat groot
2	3	7,44	2,48	
3	2	3,69	1,85	
4	2	4,85	2,43	
5	2	4,84	2,42	
6	2	4	2,00	
7	3	7,97	2,66	kan korter
8	8	19,57	2,45	zou sneller kunnen+scooter
9	9	18	2,00	
10	2	5,06	2,53	
11	3	6,31	2,10	
12	2	4,18	2,09	
13	3	5,97	1,99	
14	4	9,22	2,31	
15	3	8,37	2,79	kan beter
16	6	12,97	2,16	
17	5	11,53	2,31	
18	4	9,06	2,27	
19	6	13,28	2,21	
20	3	7,94	2,65	niet vlot genoeg
21	3	6	2,00	
22	6	14,84	2,47	3e traag
23	2	4,56	2,28	
24	3	6,97	2,32	
25	5	11,56	2,31	
26	2	4,78	2,39	
27	2	4,88	2,44	
28	2	4,56	2,28	
29	2	4,28	2,14	
30	2	4,32	2,16	
31	5	10,62	2,12	
32	2	4,32	2,16	
33	2	4,09	2,05	
34	2	4,07	2,04	
35	5	9,65	1,93	
36	4	9,25	2,31	kan beter
37	2	3,69	1,85	
38	3	7,37	2,46	
39	3	6,5	2,17	
40	2	4,72	2,36	
41	3	7,1	2,37	
42	3	6,44	2,15	
43	2	4,22	2,11	
44	3	7,47	2,49	
45	3	5,03	1,68	
46	2	3,43	1,72	
47	3	6,19	2,06	
48	4	8,43	2,11	
49	2	4,03	2,02	

50	4	8,4	2,10	
51	3	6,59	2,20	
52	4	7,53	1,88	
53	4	7,84	1,96	
54	2	4,22	2,11	
55	3	5,94	1,98	
56	4	9,03	2,26	
57	3	5,93	1,98	
58	2	4,66	2,33	
59	2	4,4	2,20	
60	4	7,91	1,98	
61	3	6	2,00	
62	3	6,79	2,26	kan beter
63	2	4,81	2,41	
64	3	7	2,33	
65	4	9,03	2,26	

13. BIJLAGE 4 STATISTIEK

In deze bijlage is te vinden op welke manier de statistische significantie van de verschillen tussen de metingen in Zeewolde en Enschede is vastgesteld. Dit is gedaan met de geschoonde metingen. De extremen, dat wil zeggen daar waar een opmerking bij de meting staat, zijn er dus uitgefilterd.

Van beide metingen wordt aangenomen dat ze normaal verdeeld zijn. De waarden die daarbij van belang zijn staan hieronder.

	Gemiddelde (μ)	Variantie (σ^2)
Enschede	2,16	0,039
Zeewolde	1,98	0,059

Hierbij geldt:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2$$

Vervolgens worden 2 hypothesen opgesteld waarvan de ene stelt dat de beide gemiddelen (μ) aan elkaar gelijk zijn en eentje die stelt dat het gemiddelde van Enschede groter is dan dat van Zeewolde.

De hypothesen worden getest aan de hand van een T waarde. Wanneer die waarde groter is dan de kritieke waarde dan wordt de nulhypothese verworpen en is de afrijcapaciteit statistisch significant groter in Zeewolde. De T waarde is afhankelijk van de steekproefgrootte van beide metingen (n) en de standaardafwijking (S) van beide metingen samen.

Verder:

$$S^2 = \frac{1}{n_E + n_Z} ((n_E - 1) \cdot \sigma_E^2 + (n_Z - 1) \cdot \sigma_Z^2) = \frac{1}{57 + 22} (56 \cdot 0,039 + 21 \cdot 0,059) = 0,04333$$

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{0,04333} = 0,20816$$

$$T = \frac{\mu_E - \mu_Z}{S \sqrt{\frac{1}{n_E} + \frac{1}{n_Z}}} = \frac{2,16 - 1,98}{0,20816 \sqrt{\frac{1}{57} + \frac{1}{22}}} = \frac{0,18}{0,011411} = 3,445$$

De kritieke waarde van T is 2,38 bij een betrouwbaarheidsinterval van 99%. In het geval de waarde groter is dan die waarde is met 99% zekerheid te zeggen dat de waarde van Zeewolde hoger is dan die van Enschede. Dat is het geval dus is de afrijcapaciteit in Zeewolde statistisch significant groter dan in Enschede.

14. BIJLAGE 5 BEREKENING ARCADY2

In deze bijlage wordt aan de hand van de formules van ARCADY2 bepaald dat de verschillen in afrijcapaciteit zijn van vier rotondes. Daarbij wordt alleen gekeken naar de variabelen “straal van de aansluitboog” (r) en “aansluithoek” (Φ) omdat die alleen veranderen bij schuinere aansluitingen. Allereerst wordt afgeleid wat de invloed is van beide variabelen. Vervolgens zal voor de verschillende rotondes worden bepaald wat de aansluitbogen en -hoeken zijn. Uiteindelijk zal daarmee worden bepaald wat de relatieve verschillen zijn tussen de rotondes.

14.1. Afleiding relatie

Een deel van de formule van ARCADY2 staat hieronder:

$$Q_e = F - f_c \cdot Q_c$$

$$F = 303 \cdot x_2 \cdot k$$

$$k = 1 - 0,00347(\Phi - 30) - 0,978\left(\frac{1}{r} - 0,05\right)$$

Hierbij is:

Q_e = Capaciteit toerit [pae/uur]

Q_c = Intensiteit rotondeverkeer [pae/uur]

Φ = Aansluithoek toerit [$^\circ$]

r = Straal aansluitboog toerit [m]

f_c = Variabele die de invloed van het rotondeverkeer aangeeft [-]

x_2 = Variabele die de invloed van de verbreding van de toerit aangeeft [-]

Hierboven staan alleen de onderdelen van de formule die te maken hebben met de hoek die de aansluitende weg maakt met de rotonde. Voor de volledige formule zie bijlage 1.1.3. De F is de afrijcapaciteit die uiteindelijk dient te worden berekend.

Door deze formule te herschrijven en alleen rekening te houden met de hoek van aansluiting en de straal van de aansluitboog kan met behulp van een formule voor de capaciteit als functie van beide grootheden worden bepaald in hoeverre de afrijcapaciteit afhankelijk is van de hoek en de boog van de toerit.

De parameter die niet afhankelijk is van de aansluiting (x_2) maar toch in de formule voor de afrijcapaciteit staat zal niet in beschouwing genomen aangezien alleen wordt gekeken naar verschillen van de aansluiting. x_2 wordt dus weggelaten. Dat gebeurt door de waarde vast te stellen op 1. Dit heeft wel tot gevolg dat de afrijcapaciteiten die verderop worden genoemd niet de werkelijke zijn. Aangezien alleen naar de verschillen wordt gekeken is dit geen probleem.

De afleiding van de functie van de afrijcapaciteit F als functie van de aansluitboog en de hoek van de toerit met de rotonde staat hieronder weergegeven:

$$k = 1 - 0,00347(\Phi - 30) - 0,978\left(\frac{1}{r} - 0,05\right)$$

$$k = 1 - 0,00347\Phi + 0,1041 - 0,978 \cdot r^{-1} + 0,0489 = 1,153 - 0,00347 \cdot \Phi - 0,978 \cdot r^{-1}$$

$$F = 303 \cdot x_2 (= 1) \cdot k = 303 \cdot (1,153 - 0,00347 \cdot \Phi - 0,978 \cdot r^{-1}) = 349,4 - 1,051 \cdot \Phi - 296,3 \cdot r^{-1}$$

De waarde 349,4 is de fictieve afrijcapaciteit die wordt bereikt als de aansluitboog en -hoek niet worden meegenomen. Verderop zal worden bepaald met welk getal deze moet worden vermindert om voor een rotonde de uiteindelijke, eveneens fictieve, afrijcapaciteit te berekenen.

14.2. Aansluitbogen en -hoeken

Nu de verschillende afhankelijkheden bekend zijn kan er worden gekeken wat de verschillende waarden van geometrische elementen van rotondes voor een effect hebben op de capaciteit volgens ARCADY2.

Er zijn vier rotondes meegenomen in dit deel van het onderzoek. De eerste rotonde (CROW-rotonde) is een rotonde met de door het CROW aanbevolen minimale afmetingen. In het geval van een toerit is dat een straal van de aansluitboog van 8 meter (CROW, 1998). De rotondes die bezocht zijn voor de meting van de afrijcapaciteit zijn ook meegenomen. Hiervan heeft Enschede een straal van 12 meter en Zeewolde een straal van 15 meter. Tevens is er een fictieve rotonde meegenomen waarvan de toerit een straal heeft van 18 meter. De reden om ook naar die laatste rotonde te kijken is om inzicht te krijgen wat een nog grotere aansluitboog voor gevolgen heeft op de capaciteit. Deze rotonde wordt ook meegenomen als het gaat om verkeersveiligheid. De hoek is bepaald met behulp van de tekeningen van de verschillende rotondes. De hoeken zijn achtereenvolgens: 72° (straal = 8m), 66° (12m), 63° (15m) en 61° (18m).

14.3. Berekening

Vervolgens is van elke rotonde de invloed op de afrijcapaciteit bepaald. In tabel B5.1 staat wat die invloed van zowel de aansluithoek als de -boog is op de functie voor F. Zo is bijvoorbeeld te zien dat bij de kleine CROW-rotonde de hoek die de toerit maakt met de rotonde zorgt voor een reductie van de (fictieve) afrijcapaciteit van 75,7 pae. In de rij totaal staat wat de afrijcapaciteit wordt op basis van de factoren. In de onderste rij staat uiteindelijk hoe de rotondes het ten opzichte van de kleine CROW-rotonde doen. De rotonde in Zeewolde heeft bijvoorbeeld een capaciteit die 11,3 procent hoger is dan die van de CROW-rotonde.

Tabel B5.1	CROW-rotonde	Enschede	Zeewolde	Fictieve
Φ	72°	66°	63°	61°
r	8	12	15	18
Invloed Φ	-75,7	-69,4	-66,2	-64,1
Invloed r	-37,0	-24,7	-19,8	-16,5
Totaal	236,6	255,3	263,4	268,8
Indexgetal	100,0	107,9	111,3	113,6

15. BIJLAGE 6 BEREKENING BOVY

In deze bijlage wordt van twee rotondes (Enschede en Zeewolde) de invloed bepaald van het afritverkeer met behulp van de formule van Bovy.

De formule van Bovy luidt (Bovy, 1991):

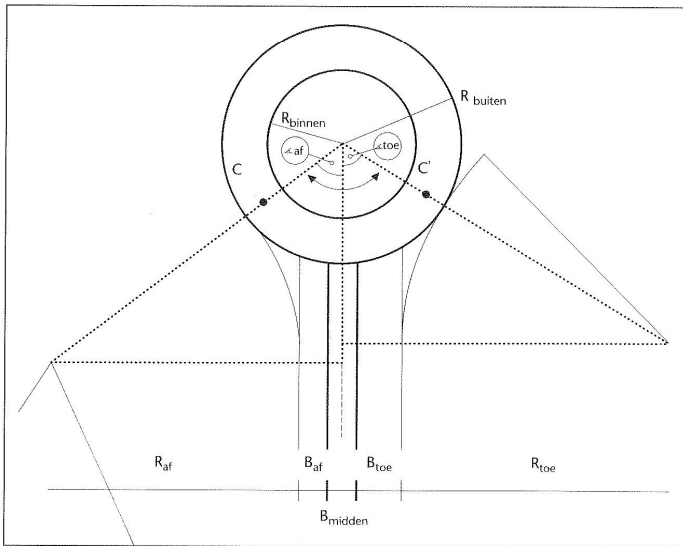
$$C_T = \frac{1}{\gamma} \left[1500 - \frac{8}{9} (\beta \cdot I_R - \alpha \cdot I_A) \right] \quad (B1.2)$$

Hierbij geldt:

- C_T = Capaciteit toerit [pae/uur]
- I_R = Intensiteit rotondeverkeer [pae/uur]
- I_A = Intensiteit afslaand verkeer [pae/uur]
- α = Invloed afslaand verkeer [-]
- β = Invloed aantal rijstroken op de rotonde [-]
- γ = Invloed aantal stroken op de toerit [-]

15.1. Enschede

Om de alfa (α) van de rotonde in Enschede te bepalen zijn een aantal afmetingen nodig. Het gaat om afmetingen van onder andere de binnen- en buitenstraal van de rotonde. De breedte van toe-, afrit en middengeleider en de aansluitbogen van toe- en afrit. De waarden daarvan zijn te vinden in bijlage 3. De afstand C-C' (figuur B6.1) is nu van belang voor de bepaling van alfa.



Figuur B6,1 Afstand C-C'

$$C - C' = R_{C-C'} \cdot (\angle_{af} + \angle_{toe})$$

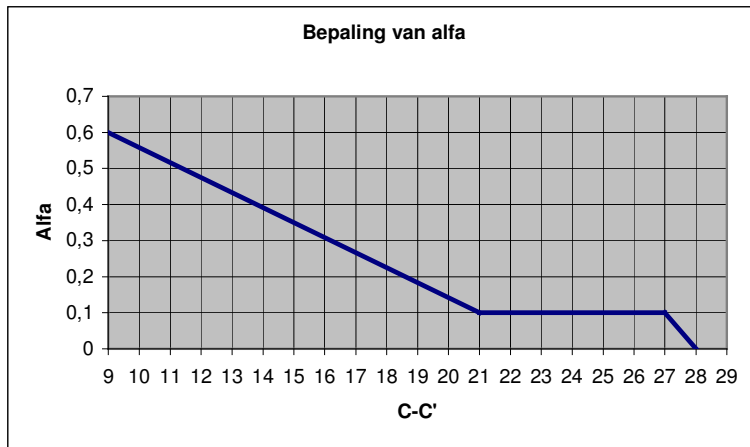
$$R_{C-C'} = \frac{R_{binnen} + R_{buiten}}{2} = \frac{10 + 15,75}{2} = 12,875$$

$$\angle_{af} (rad) = \arcsin \left(\frac{R_{af} + B_{af} + 0,5 \cdot B_{midden}}{R_{buiten} + R_{af}} \right) = \arcsin \left(\frac{15 + 3,73 + 0,5 \cdot 2}{15,75 + 15} \right) = 0,697$$

$$\angle_{toe} (rad) = \arcsin \left(\frac{R_{toe} + B_{toe} + 0,5 \cdot B_{midden}}{R_{buiten} + R_{toe}} \right) = \arcsin \left(\frac{12 + 3,31 + 0,5 \cdot 2}{15,75 + 12} \right) = 0,628$$

$$C - C' = R_{C-C'} \cdot (\angle_{af} + \angle_{toe}) = 12,875 \cdot (0,697 + 0,628) = 17,1$$

De alfa is vervolgens met figuur B6.2 te bepalen.



Figuur B6.2 Bepaling van alfa met behulp van C-C'

In de figuur is te zien dat bij een afstand van C naar C' van 17,1 geldt dat de waarde van alfa 0,26 is.

15.2. Zeewolde

Voor de rotonde in Zeewolde kan ook een alfa bepaald worden. De benodigde gegevens zijn te vinden in bijlage 2. De berekening is hieronder te vinden:

$$R_{C-C'} = \frac{R_{binnen} + R_{buiten}}{2} = \frac{11,75 + 17}{2} = 14,375$$

$$\angle_{af} (rad) = \arcsin\left(\frac{R_{af} + B_{af} + 0,5 \cdot B_{midden}}{R_{buiten} + R_{af}}\right) = \arcsin\left(\frac{18 + 4,2 + 0,5 \cdot 3}{17 + 18}\right) = 0,744$$

$$\angle_{toe} (rad) = \arcsin\left(\frac{R_{toe} + B_{toe} + 0,5 \cdot B_{midden}}{R_{buiten} + R_{toe}}\right) = \arcsin\left(\frac{15 + 3,7 + 0,5 \cdot 3}{17 + 15}\right) = 0,638$$

$$C - C' = 14,375 \cdot (0,744 + 0,638) = 20,5$$

De waarde voor alfa die hieruit volgt is 0,12.

De waarde van alfa is in Enschede dus meer dan het dubbele dan die in Zeewolde. Dat wil zeggen dat een rotonde-pae in Enschede dus meer dan dubbel telt in Enschede dan in Zeewolde. Het schijnconflict tussen afrit- en toeritverkeer in Enschede is dus een stuk groter dan in Zeewolde. De capaciteit in Enschede wordt dus negatiever beïnvloedt door afritverkeer dan in Zeewolde.

16. BIJLAGE 7 TAAKANALYSE

In deze bijlage wordt een taakanalyse uitgevoerd die gebaseerd is op die van Weijermars (2001). Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat de door Weijermars uitgevoerde taakanalyse is gericht op verschillende voorrangsregelingen en deze op de verschillende soorten aansluitingen van rotondes. Hierdoor worden sommige onderdelen uit het onderzoek van Weijermars niet meegenomen en andere juist toegevoegd.

Een goede taakanalyse bestaat uit de volgende onderdelen:

- Feitelijke beschrijving van de rijtaak, task requirements
- Beschrijving van de gedragsvereisten, performance objectives
- Beschrijving van de vermogensvereisten, performance objectives

Het doel van deze taakanalyse is om inzicht te krijgen in de beïnvloeding van de taakuitvoering door een rotonde met rechte aansluitingen en één met schuinere aansluitingen. Het is dan ook van belang om de rijtaak duidelijk te beschrijven. Op de gedrags- en vermogensvereisten wordt dan ook alleen ingegaan als die worden beïnvloed door verschillen in geometrie tussen de rotondes. In tegenstelling tot het onderzoek van Weijermars, dat voornamelijk over fietsers ging, zal hier ook rekening worden gehouden met voetgangers. Allereerst zijn voor de verschillende verkeersdeelnemers verschillende deeltaken onderscheiden. Vervolgens zullen die deeltaken overzichtelijk worden weergegeven in stroomdiagrammen en uiteindelijk zal met behulp van subdeeltaken worden bekeken wat de verschillen zijn tussen de twee typen rotondes.

16.1. Definiëring deeltaken

De deeltaken voor automobilisten en bus/vrachtwagenchauffeurs¹⁴ zijn:

- Naderen rotonde
- Oprijden rotonde
- Volgen rotonde
- Verlaten rotonde

In figuur 7.1 staan de deeltaken overzichtelijk weergegeven in een stroomdiagram.

Voor (brom)fietsers in en uit de voorrang zijn er de volgende deeltaken:

- Naderen rotonde
- Oprijden rotonde
- Volgen rotonde
- Kruisen rotonde verlatend verkeer
- Kruisen rotonde naderend verkeer
- Verlaten rotonde

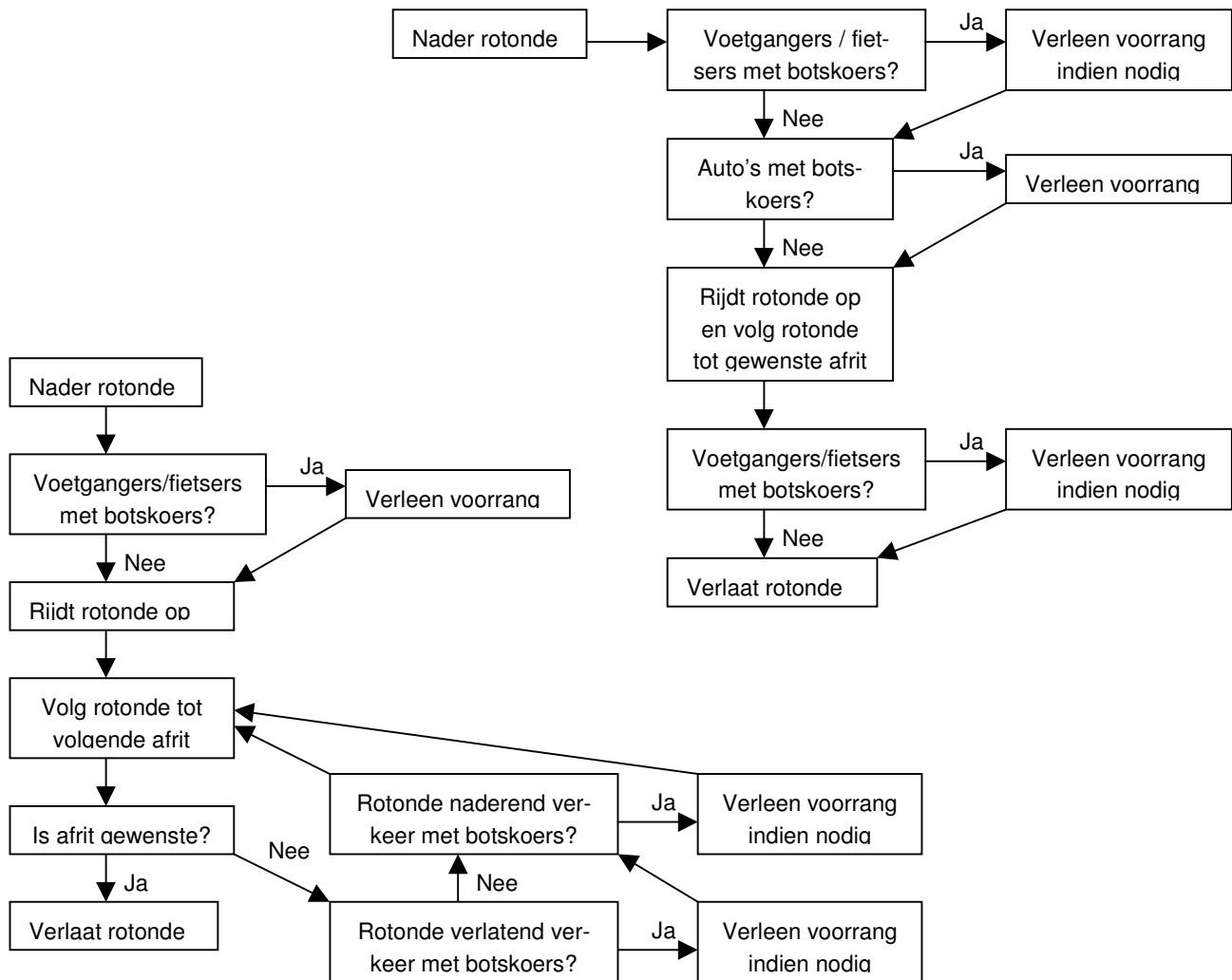
Ook hiervan is een stroomdiagram gemaakt, figuur 7.2.

Voor voetgangers zijn er wat andere deeltaken te onderscheiden. Dit komt vooral de rotonde minder goed als één geheel te zien is. Eigenlijk is elke tak in dit geval een apart onderdeel dat moet worden overgestoken. De deeltaken zijn:

- Naderen zebrapad
- Oplopen zebrapad
- Volgen zebrapad
- Oplopen trottoir

Het stroomdiagram is te vinden op figuur 7.3.

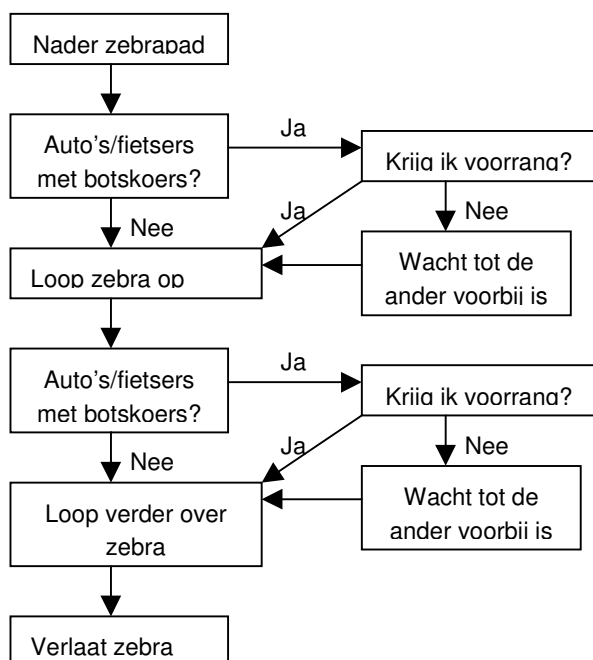
¹⁴ Wanneer verderop in deze bijlage sprake is van auto's of automobilisten dan wordt deze groep bedoeld, dus inclusief vrachtwagen- en buschauffeurs.



Rechts boven: **Figuur B7.1**, Stroomdiagram automobilisten

Links: **Figuur B7.2**, Stroomdiagram (brom)fietsers

Links onder: **Figuur B7.3**, Stroomdiagram voetgangers



16.2. Uitwerking deeltaken

Naderen van de rotonde

Het naderen van de rotonde kent de volgende sub-deeltaken voor automobilisten:

- Detecteren van het “kruispunt”
- Identificeren van kruispunt als zijnde rotonde
- Kiezen van een route (rechtsaf/rechtdoor/linksaf)

Voor (brom)fietzers kent het naderen van de rotonde de volgende sub-deeltaken:

- Detecteren van het “kruispunt”
- Identificeren van kruispunt als zijnde een rotonde
- Kiezen van een route (rechtsaf/rechtdoor/linksaf)
- Kiezen/uitstippelen van de te volgen route (voornamelijk bij tweestrooks fietspad)
- Eventueel voorsorteren

Er is niet echt veel risico op ongevallen bij de deeltaak “naderen van de rotonde”. Wat wel kan is dat wanneer het kruispunt niet (als rotonde) wordt gedetecteerd er verderop in de handelingen problemen ontstaan. Ongevallen die nog wel kunnen plaatsvinden zijn voornamelijk kop-staartbotsingen aangezien er plotseling geremd kan worden. Dit zal voornamelijk het geval zijn als het kruispunt niet op tijd is gedetecteerd.

De geometrie van de rotonde moet ook geschikt zijn om de fietsers te helpen bij de keuze van de route. Zo moet er worden voorkomen dat fietsers illegale routes af gaan leggen. Zo kan bijvoorbeeld met niet al te grote rotondes worden voorkomen dat fietsers tegen de rijrichting in gaan rijden. Aangezien beide soorten rotondes dezelfde buitendiameter hebben zal dit uiteindelijk dus niet tot verschillen in ongevallen leiden.

Oprijden rotonde

Het oprijden van de rotonde kent de volgende sub-deeltaken voor automobilisten en (brom)fietzers:

- Identificatie van de voorrangsregeling (fietsers in/uit voorrang)
- Detectie mogelijk conflicterend verkeer
- Rechtsafslaan (op rotonde), eventueel linksaf bij fietsers op tweestrooks fietspad of illegaal

De crux zit hem hier wat betreft de verschillen tussen de twee typen rotondes in de detectie van het conflicterend verkeer. Op rotondes met schuinere aansluitingen zal harder worden gereden. Hierdoor neemt de tijd af die gebruikt kan worden om overige weggebruikers te detecteren. Dit komt doordat zowel de te detecteren fietser/auto als het eigen voertuig sneller rijden (in het geval van een auto). De kans dat er een weggebruiker wordt gemist en er dus een ongeval plaatsvindt wordt zo dus groter. Tevens wordt de kans op een zwaar ongeluk bij hogere snelheden groter.

Bij het rechtsafslaan kunnen, behalve de hiervoor genoemde conflicten met rotondeverkeer, ook eenzijdige ongevallen plaatsvinden. Bij schuinere aansluitingen is de aansluiting soepeler en komt de “afslag” minder als een verrassing. Hierdoor zal een rechte aansluiting waarschijnlijk meer eenzijdige ongevallen opleveren.

Voor kop-staartongevallen gelden een aantal tegenstrijdige verschillen. Andere weggebruikers zullen vaker later worden gedetecteerd, waardoor er meer noodstops zullen plaatsvinden. Noodstops kunnen weer tot kop-staartbotsingen leiden. Doordat de aansluiting echter soepel gaat hoeft er minder hard afgeremd te worden voor de rotonde zelf. Hierdoor neemt de kans op ongevallen juist af. Wat ook in het voordeel werkt van de schuinere aansluitingen is dat er eerder kan worden gezien of een voertuig afslaat. Hierdoor zal er minder vaak onnodig, al dan niet hard, geremd hoeven worden voor voertuigen die geen of laat richting aangeven. Het aantal kop-staartbotsingen zal naar verwachting ongeveer gelijk blijven omdat de verschillende verschijnselen elkaar tegenwerken.

Volgen rotonde

Deze deeltaak is te vergelijken met het berijden van een éénrichtingsweg in een bocht naar links. Aangezien er geen verschil zit in de bocht die bereden wordt zal er zo goed als geen verschil zitten tussen rechte en schuine aansluitingen.

Kruisen rotondenaderend en -verlatend verkeer

Deze deeltaken zijn er alleen voor fietsers en voetgangers aangezien die de toe- en afrit van de rotonde kruisen. Als beide groepen weggebruikers uit de voorrang zijn worden de sub-deeltaken:

- Detecteren van de kruising
- Identificeren van de voorrangsregeling
- Detecteren van rotondeverlatend of -naderend verkeer
- Voorspellen of sprake is van een botskoers
- Voorrang verlenen

Bij fietsers en voetgangers in de voorrang worden de sub-deeltaken:

- Voorspellen of de automobilist voorrang zal verlenen
- Indien nodig reageren om een ongeval te voorkomen

Het verschil in veiligheid heeft ook met fietsers en voetgangers uit de voorrang weer te maken met snelheidsverschillen. Wanneer de snelheid van de auto's hoger ligt (schuinere aansluitingen) zal een auto eerder moeten worden gedetecteerd om te kunnen zien of er overgestoken kan worden. Aangezien de auto's voorrang hebben moet sowieso gewacht worden door de fietsers en voetgangers. Een grote verandering van het aantal ongevallen is dan ook niet te verwachten.

Wanneer fietsers en voetgangers wel in de voorrang worden afgewikkeld kan het juist wel zo zijn dat er meer ongevallen plaatsvinden op rotondes met schuinere aansluitingen. Dit vanwege de hogere snelheden van de auto's. De bestuurders van die auto's hebben dan minder tijd om langzaam verkeer te detecteren en de kans op ongevallen wordt dan groter. Het is dan afhankelijk van de mate van defensief gedrag van de fietsers en voetgangers in hoeverre dit echt een groot verschil uitmaakt. Het zou namelijk kunnen zijn dat fietsers juist op een rotonde waarvan ze weten dat automobilisten over het algemeen hard rijden defensiever rijden dan op andere rotondes.

Verlaten rotonde

Voor fietsers is de deeltaak "verlaten rotonde" erg gemakkelijk aangezien er geen kruisende auto's zijn. Eventueel moeten fietsers voorrang verlenen aan voetgangers als er zebrapaden aanwezig zijn op het fietspad. Voor auto's echter kan het verlaten van de rotonde wel een complexe deeltaak zijn, zeker als er ook een voetgangersoversteekplaats is. De deeltaken voor auto's zijn:

- Detecteren van de kruising (alleen fietsers of ook voetgangers, of geen van beide)
- Detecteren van rotondevolgende fietsers/voetgangers
- Voorspellen of er sprake is van botskoers
- Voorrang verlenen
- Rtonde verlaten

De verschillen tussen de schuine en de rechte aansluitingen zijn naar verwachting niet erg groot. Dit aangezien het detecteren van de fietsers en voetgangers en het voorspellen van een eventuele botskoers voornamelijk gebeurt op de rotonde zelf. Dit aangezien de snelheid op de rotonde, en daarmee de tijd die beschikbaar is om te detecteren en te voorspellen, afhankelijk is van de rotondediameter en de diameter niet anders is bij één van de twee typen rotondes. De tijd is dus gelijk en dus ook de kans dat een fietser/voetganger wordt gedetecteerd. Een reden waarom bij voetgangers de kans op een ongeval toch groter kan zijn is dat de oversteekplaatsen vaak wat verder van de rotonde afliggen, waardoor de snelheid toch wat hoger ligt bij een minder scherpe aansluitboog.

17. BIJLAGE 8 ZICHTBAARHEID

In deze bijlage wordt weergegeven hoe de zichthoeken zijn bepaald. Eerst wordt berekend welk moment cruciaal is voor het detecteren. Vervolgens wordt aan de hand van een voorbeeldauto gekeken naar de zichtbaarheid van fietsers voor de automobilist. De zichtanalyse is toegevoegd om de verkeersveiligheid van fietsers te bekijken. Het zicht op auto's wordt dan ook niet meegenomen. Over de verkeersveiligheid van auto's is al voldoende bekend.

Een automobilist moet een fietser tijdig kunnen detecteren als die op een dusdanige koers is dat de automobilist zou botsen met de fietser wanneer hij geen vaart zou minderen. Wanneer de snelheid van één van beide verkeersdeelnemers hoger is zal de detectie eerder moeten plaatsvinden om een ongeval te voorkomen. Tevens toonde Laya (1988) aan dat de fixatietijd groter wordt bij hogere snelheden. Een automobilist moet dus gemiddeld langer turen voordat hij een fietser kan detecteren. Aangezien de verschillen in snelheid niet extreem zijn zal niet worden ingegaan op het verschil in fixatietijd. Wat wel van belang blijft is het zicht op het moment dat er gedetecteerd moet worden.

Eerst moet worden bepaald op welk moment er moet worden gedetecteerd. Het ligt voor de hand dat op het moment dat een auto een fietser gedetecteerd heeft hij nog moet kunnen reageren en dat de auto dan nog moet kunnen afremmen. De totale tijd (t) vanaf het begin van het fixeren tot het stilstaan is dus de tijd waar rekening mee wordt gehouden. Daarmee samenhangend geldt ook dat de afstand (s) die wordt afgelegd is opgebouwd uit de afstand tijdens het fixeren, de afstand tijdens het reageren en de afstand die nodig is om tot stilstand te komen.

In formulevorm:

$$t_{\text{totaal}} = t_{\text{fixatie}} + t_{\text{reactie}} + t_{\text{remweg}}$$

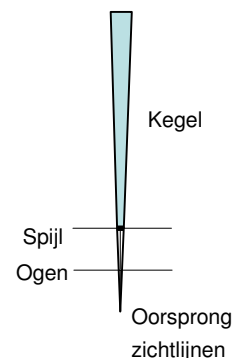
$$s_{\text{totaal}} = s_{\text{fixatie}} + s_{\text{reactie}} + s_{\text{remweg}}$$

Allereerst moeten de tijden worden bepaald van de fixatie en de reactie. Hierbij kan het onderzoek van Laya (1988) gebruikt worden. Laya vond namelijk uit dat op een langzame toerit, zoals zowel de toeritten in Enschede als Zeewolde, de fixatietijd 0,22 seconden is. De reactietijd wordt bij een ongeval vaak vastgesteld op 1 seconde¹⁵. De totale tijd is nu dus al 1,22 seconden zonder dat er ook maar enige snelheid is geminderd. Voor de remvertraging wordt in Nederland 8 m/s² aangenomen. Verder wordt aangenomen dat de afstand van de ogen van de bestuurder tot de voorbumper 1,5 meter is. Tevens is nog aangenomen dat fietsers gemiddeld 15 km/uur rijden. Met behulp van deze getallen kan de totale afstand en de tijd voor de verschillende rotondes worden berekend. In tabel B8.1 staan de uitkomsten van deze berekening. De afstand van de fiets is in die tabel de afstand die een fietser in de "detectietijd" aflegt.

	Enschede	Zeewolde	Fictief
Detectietijd (s)	2,49	2,58	2,65
Afstand auto (m)	20,38	22,16	23,65
Afstand fiets (m)	10,38	10,75	11,04

Tabel B8.1 Detectietijd en -afstand

Nu de afstanden en tijden bekend zijn kan worden bekeken wat op het moment dat de detectie moet beginnen het zicht is van de automobilist. Hiervoor is bij een auto opgemeten wat de afstand is van ogen tot de spijl in de auto. Ook is gekeken hoe breed die spijl is en hoe ver de ogen van een persoon uit elkaar staan. De gevonden waarden zijn ook nog gecontroleerd aan de hand van een praktijksituatie op een bepaalde afstand. Aan de hand van deze informatie kunnen zichtlijnen worden bepaald van die persoon. Die zichtlijnen leiden uiteindelijk tot een "kegel" waarop de bestuurder geen zicht heeft (zie figuur B8.1).

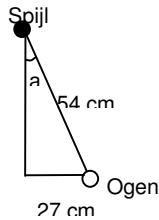


Figuur B8.1 Dode hoek kegel

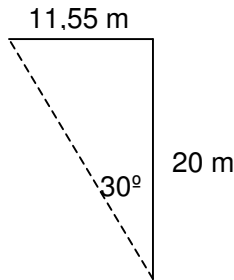
¹⁵ <http://www.crow.nl/asp/bumperkleven/bumperkleven.asp>

De gemeten afstanden voor de auto en de bestuurder staan in figuur B8.2. Verder is de afstand tussen de ogen onderling 4,5 centimeter en de breedte van de spijl is 9 centimeter. De auto waaraan de metingen zijn gedaan is een Mazda 6 Sportbreak (stationwagon).

De hoek (α) van kijken ten opzichte van de auto is 30° . Dat wil dus zeggen dat het midden van de dode hoek altijd op 30° ligt. Voorbeeld: als de afstand tot het fietspad 20 meter is dan ligt het centrum van de dode hoek op $20 \cdot \tan(30^\circ) = 11,55$ meter van het conflictpunt (figuur B8.3).



Figuur B8.2 Afstand tussen ogen en spijl



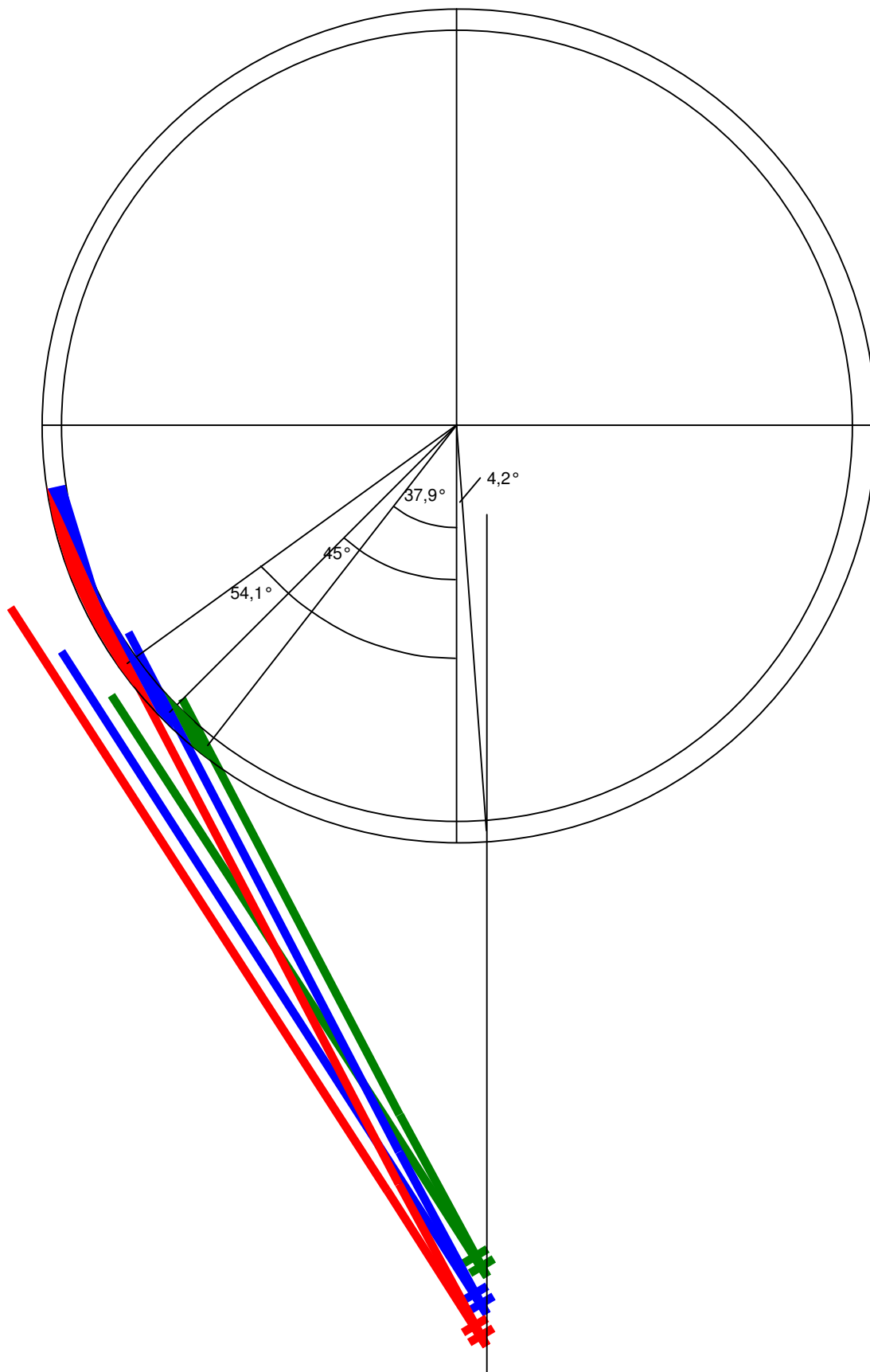
Figuur B8.3
Voorbeeld

Op figuur B8.4 (volgende pagina) zijn de gebieden gekleurd die in de dode hoek en op het fietspad liggen op het detectiemoment. Sommige stukken vallen in verschillende dode hoeken. In dat geval is de kleur weergegeven van de dode hoek die hoort bij de auto die het verst weg is en dus ook het hardste rijdt. Er geldt dat het gebied tussen twee gelijkgekleurde lijnen in de dode hoek van de spijl van de voorruit ligt. De rotonde in Enschede is weergegeven in het groen. De lijnen van de rotonde van Zeewolde zijn blauw en die van de fictieve rotonde is rood. Bij de figuur is wel uitgegaan van een rotonde met dezelfde diameter, hoewel dit in werkelijkheid niet zo is. Voor de vergelijking is het echter wel zo handig dit wel te doen. Er is uitgegaan van een rotonde met een buitendiameter van 32 meter. Tussen de fietsstrook en de buitendiameter zit dan nog 5 meter (aanbeveling CROW) en het fietspad is 2 meter breed. De buitendiameter van het fietspad is dan dus 39 meter ($32 + 5 + 2$). De hoeken die er staan weergegeven zijn bepaald en worden gebruikt voor de bepaling van de afstand over het fietspad van de dode hoek tot het conflictpunt. De afstanden die gevonden zijn worden weergegeven in tabel B8.2. Daarin staat ook op welk punt de fietser in werkelijkheid is. Tevens is er weergegeven of de fietser goed is te zien op het bewuste moment.

	Enschede	Zeewolde	Fictief
Afstand dode hoek-conflict-punt (m)	14,0	16,3	19,3
Afstand fiets (m)	10,38	10,75	11,04
Goed te zien?	Ja	Ja	Ja

Tabel B8.2 Detectietijd en -afstand

Aan de tekening van de dode hoeklijnen is te zien dat de fietsers pas laat in de daadwerkelijke dode hoek achter de spijl van de voorruit terechtkomen. Op zich moet het dus geen probleem zijn om de fietsers te detecteren. Voor alle drie de gevallen is de kans dat er gedetecteerd wordt dus ongeveer gelijk.



Figuur B8.4 Zichtlijnen voor bepaling dode hoek

18. BIJLAGE 9 STELLINGEN

Vooraf: het onderzoek gaat alleen in op enkelstrooksrotondes. Wanneer er in de stelling niet wordt gesproken over een type voorrangsregeling dan gaat het om fietsers uit de voorrang.

- Een vergroting van de straal van de aansluitboog met een aantal (3 tot 8) meter zal een behoorlijke capaciteitswinst opleveren.
- De snelheid die op de rotonde en op de toerit wordt gereden heeft niet veel invloed op de capaciteit van de toerit maar wel op de verkeersveiligheid.
- Schuinere aansluitingen op rotondes leiden duidelijk tot grotere verkeersonveiligheid. (fietsers in de voorrang)
- De zichtbaarheid van fietsers voor automobilisten en niet de gereden snelheid is de belangrijkste variabele voor de fietsverkeersveiligheid van een rotonde. (fietsers in de voorrang)

19. BIJLAGE 10 PROPOSITIONS

In advance: The investigation only accounts for one-lane roundabouts.

- The enlargement of the entry curves of about 3 to 8 meters can lead to a considerable capacity gain of the entry.
- The speed on an entry and a roundabout doesn't have much impact on the capacity of the entry, but has quite some impact on the traffic safety of the roundabout.
- The enlargement of the entry curves of roundabouts leads to considerable lower traffic safety. (When bicyclists are in priority, so car drivers have to give way to cyclists both the exit and entry of a roundabout)
- The visibility of bicyclists for car drivers is the most important variable for the bicycle-traffic safety of roundabouts. (So speed isn't) *Please answer only if applicable for your country, so if cyclists are an issue.*