

Ontwerpregels voor kruispunten in stedelijk netwerken

Erwin Bezembinder
Hogeschool Windesheim / Universiteit Twente
e.bezembinder@windesheim.nl

Luc Wismans
Universiteit Twente
l.j.j.wismans@utwente.nl

Eric van Berkum
Universiteit Twente
e.c.vanberkum@utwente.nl

**Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk
21 en 22 november 2013, Rotterdam**

Samenvatting

Ontwerpregels voor kruispunten in stedelijke netwerken

Veel ontwerprichtlijnen voor wegen bevatten richtlijnen of aanbevelingen voor het ontwerpen van kruispunten in stedelijke gebieden. Daarbij gaat het in eerste instantie om het bepalen van het kruispunttype en vervolgens om de specifieke inrichting van bijvoorbeeld de (opstel)stroken, instellingen voor een eventuele verkeersregelininstallatie en de voorrangregeling voor fietsers en/of voetgangers. De richtlijnen bevatten vaak een set van regels welke gebruikt kunnen worden om te bepalen welk kruispuntontwerp, of welk kruispunttype, in een specifieke situatie het beste is. Wat het beste is en dus welke criteria daarbij van belang zijn, kan daarbij variëren. De set van regels is doorgaans gebaseerd op vuistregels en/of eenvoudige (hiërarchische) beslisschema's met als invoer de intensiteiten voor alle richtingen op het kruispunt. Er wordt gewerkt met criteria voor verkeersveiligheid en verkeersafwikkeling en in beperkte mate met criteria ten aanzien van milieu. De huidige ontwerpregels ontberen eenduidigheid. In de criteria worden meerdere vuistregels en rekenmethoden en criteria voor meerdere beleidsdoelen door elkaar gebruikt. Daarnaast wordt vaak een beperkt aantal ontwerpvarianten getoetst, waardoor de kans aanwezig is dat de 'beste' oplossing niet gevonden wordt, omdat deze variant niet is bedacht. Verder is het de vraag wat voor effect het consequent doorvoeren van lokale ontwerpregels heeft op de netwerkprestaties voor verschillende beleids(doelen). Wellicht is het beter om op bepaalde locaties te kiezen voor een 'sub-optimale' doserende kruispuntvorm, ten behoeve van een betere prestatie op netwerkniveau.

Er is behoefte aan ontwerpregels voor kruispunten in stedelijke netwerken, waarmee op een systematische wijze een afweging gemaakt kan worden tussen het belang of gewicht van verschillende beleidsdoelen op zowel lokaal als netwerkniveau. Hierbij gaat het met name om beleidsdoelen die bijdragen aan het minimaliseren van de negatieve effecten van verkeer, zoals congestie, verkeersonveiligheid, uitstoot van schadelijke stoffen en geluidhinder.

In deze paper wordt een onderzoeksopzet gepresenteerd waarmee deze behoefte wordt ingevuld en dus ontwerpregels bepaald, geanalyseerd en toegepast kunnen worden. Dit gebeurt op basis van modelsimulaties en de regels worden uiteindelijk toegepast in een beslissingsondersteunend instrument. De resultaten van het onderzoek zijn naast de nieuwe ontwerpregels, nieuwe kennis of inzichten in de netwerkeffecten van ontwerpregels voor meerdere doelen, een instrument om de regels te bepalen en een beslissingsondersteunend instrument voor het toepassen van de regels in beleidssituaties. De onderzoeksopzet wordt geïllustreerd aan de hand van een eerste uitwerking op basis van een theoretisch voorbeeld.

1. Inleiding

Veel ontwerprichtlijnen voor wegen bevatten richtlijnen of aanbevelingen voor het ontwerpen van kruispunten in stedelijke gebieden (b.v. AASHTO, 2011; Austroude, 2009; CROW 2002, 2012; FSGV, 2007; Highways Agency, 2012). Daarbij gaat het in eerste instantie om het bepalen van het kruispunttype en vervolgens om de specifieke inrichting van bijvoorbeeld de (opstel)stroken, instellingen voor een eventuele verkeersregelinstantie en de voorrangregeling voor fietsers en/of voetgangers. De richtlijnen bevatten vaak een set van regels welke gebruikt kunnen worden om te bepalen welk kruispuntontwerp, of welk kruispunttype, in een specifieke situatie het beste is. Wat het beste is en dus welke criteria daarbij van belang zijn, kan daarbij variëren. De set van regels is doorgaans gebaseerd op vuistregels en/of eenvoudige (hiërarchische) beslisschema's. In het ASVV (CROW, 2012) wordt bijvoorbeeld geadviseerd om een rotonde aan te leggen wanneer twee gebiedsontsluitingswegen elkaar kruisen, tenzij beperkingen op het gebied van capaciteit, vertraging, beschikbare ruimte en kosten anders doen besluiten. Dit is een typische regel voor het kruispunttype, waarbij de initiële keuze is gebaseerd op een verkeersveiligheids criterium (rotondes zijn veiliger dan andere kruispunttypen) en er controles uitgevoerd worden ten aanzien van doorstroming, kosten en lokale criteria. Andere criteria die bepalend kunnen zijn voor het kruispuntontwerp hebben betrekking op de uitstoot van schadelijke stoffen, geluidhinder, energie- en brandstofverbruik, barrière-effect, visuele hinder en andere criteria gerelateerd aan verkeersveiligheid zoals beleving (subjectieve veiligheid). In de praktijk wordt vooral gekeken naar doorstroming en veiligheid als belangrijkste criteria. Met name voor doorstroming is er een veelheid aan vuistregels, rekenregels en modellen beschikbaar voor het bepalen van capaciteiten, vertragingen en wachtrijen. Veiligheid wordt daarbij vaak in de vorm van een voorkeur voor een bepaalde kruispuntvorm meegenomen. Andere criteria worden slechts beperkt meegenomen in de afweging voor het bepalen van het beste kruispuntontwerp. Deze criteria zie je dan ook niet of nauwelijks terug in de ontwerpregels. Daarnaast is het zo dat de ontwerpregels vormgegeven worden door ofwel tamelijk eenvoudige (en beperkte) vuistregels ofwel door uitgebreide (en complexe) rekenregels en/of rekenmodellen. Met de huidige ontwerpregels is dus geen goede afweging mogelijk tussen criteria die beleidsmatig relevant zijn bij de keuze van een kruispuntontwerp en lijkt er een gat te bestaan tussen de vuistregels en de rekenregels/-modellen.

Alhoewel bij de bepaling van het kruispuntontwerp gezocht wordt naar een inrichting met bijvoorbeeld zo laag mogelijke vertragingen is het nog maar de vraag of dat op netwerkniveau ook tot lagere vertragingen leidt. Datzelfde geldt voor de ontwerpregels. Het is de vraag of het structureel doorvoeren van een ontwerpregel op basis van verkeersveiligheid en doorstroming op netwerkniveau ook tot een 'optimale' veiligheid en doorstroming leidt. Sommige bestaande ontwerpregels zijn gebaseerd op basis van beleid of voorkeuren en dienen meerdere doelen. Dat maakt het extra lastig om de effecten te isoleren om zodoende een afgewogen keuze te kunnen maken. Welke kruispuntontwerpen zijn in een stedelijk netwerk noodzakelijk als zwaar of enkel ingezet wordt op verkeersveiligheid? Welke concessies worden er dan gedaan ten aanzien van de uitstoot van schadelijke stoffen en/of de doorstroming?

Er is behoefte aan ontwerpregels voor kruispunten in stedelijke netwerken, waarmee op een systematische wijze een afweging gemaakt kan worden tussen het belang of gewicht van verschillende beleidsdoelen op zowel lokaal als netwerkniveau. Hierbij gaat het met name om beleidsdoelen die bijdragen aan het minimaliseren van de negatieve effecten van verkeer, zoals congestie, verkeersonveiligheid, uitstoot van schadelijke stoffen en geluidhinder.

In deze paper wordt een onderzoeksopzet gepresenteerd waarmee deze behoefte wordt ingevuld en dus ontwerpregels bepaald, geanalyseerd en toegepast kunnen worden. Dit gebeurt op basis van modelsimulaties en de regels worden uiteindelijk toegepast in een beslissingsondersteunend instrument. De resultaten van het onderzoek zijn naast de nieuwe ontwerpregels, nieuwe kennis of inzichten in de netwerkeffecten van ontwerpregels voor meerdere doelen, een instrument om de regels te bepalen en een beslissingsondersteunend instrument voor het toepassen van de regels in beleidssituaties.

De opbouw van de paper is als volgt. In paragraaf 2 wordt allereerst kort ingegaan op de bestaande ontwerprichtlijnen of -regels en wordt gesproken over de uitbreidingsmogelijkheden van deze regels. In paragraaf 3 wordt de onderzoeksopzet toegelicht. In paragraaf 4 wordt een eerste uitwerking van de onderzoeksopzet aan de hand van een theoretisch voorbeeld gepresenteerd. In paragraaf 5 wordt kort ingegaan op de status en het vervolg van het onderzoek.

2. Ontwerpregels voor kruispunten

Bestaande ontwerpregels

Veel ontwerprichtlijnen voor het ontwerpen van wegen bevatten regels voor het ontwerpen van kruispunten. In Nederland zijn deze regels vooral te vinden in CROW-publicaties. De regels zijn bedoeld om in een vroegtijdig stadium van het ontwerpproces (planvorming voor het ontwerp) te bepalen, welk kruispuntontwerp het beste is. Er wordt een afweging gemaakt welke kruispuntvormen wel en welke kruispuntvormen niet wenselijk zijn. Er wordt daarom vaak gesproken over de afweging van de kruispuntvorm. Daarbij kunnen verschillende niveaus van toetsing gebruikt worden, van grof naar fijn. Een eerste toetsing is zeer globaal. Afhankelijk van die toetsing kunnen meer verfijnde methoden gebruikt worden. In de praktijk kan meestal worden volstaan met een globale toetsing, waarbij alleen in geval van twijfel een verfijndere rekenmethode wordt toegepast. In diverse CROW-publicaties wordt onderscheid gemaakt naar de volgende niveaus van afwegingsmethodieken:

- Vuistregels;
- Rekenregels;
- Macroscopische rekenmodellen;
- Microscopische rekenmodellen.

In hoofdlijnen kan onderscheid gemaakt worden naar vuistregels en rekenmethoden. In beide gevallen bestaat de invoer uit de intensiteiten voor alle richtingen op het kruispunt. Daarbij wordt gebruik gemaakt van zowel etmaalintensiteiten als intensiteiten voor het n -drukste uur. Vervolgens wordt een criterium bepaald en worden grenswaarden opgesteld. Een zeer bekend voorbeeld is het zogenaamde intensiteitscriterium van 'Slop'. Dit criterium wordt gebruikt om op een snelle manier te bepalen of er verkeerslichten op een voorrangskruispunt geplaatst kunnen of moeten worden.

Het criterium werd al in 1975 ontwikkeld (Slop, 1975) maar wordt nog steeds als vuistregel gehanteerd in de huidige richtlijnen (CROW, 2012a, 2012b). Voor een kruispunt wordt voor het achtste drukste uur (of eventueel voor het drukste n uur) de waarde van α bepaald met de volgende formule:

$$\alpha = \frac{I_2}{I_1} h(-1 + \sqrt{1 + \beta \times I_n \div I_2})$$

I_h	Intensiteit van de drukst bereden weg; totaal van alle voertuigen die in beide richtingen het kruispunt naderen (pae/h);
I_z	Intensiteit op de zijweg in de drukste naderingsrichting; dus in één richting (pae/h);
I_1	Parameter afhankelijk van het aantal opstelvakken op de zijweg en de snelheidslimiet (pae/h);
β	Parameter afhankelijk van het aantal rijstroken op de hoofdweg en het aantal opstelvakken op de zijweg.

Op basis van α gelden drie mogelijke adviezen voor vierarmige kruispunten:

- $\alpha \leq 1,00$: verkeerslichten zijn ongewenst;
- $\alpha \geq 1,33$: verkeerslichten zijn in beginsel gewenst;
- $1,00 < \alpha < 1,33$: verkeerslichten zijn niet direct gewenst, maar ook niet geheel ongewenst.

Het intensiteitscriterium van Slop weegt slechts één aspect af, namelijk of de capaciteit van het kruispunt voldoende is voor een voorrangskruispunt of niet. Vaak wordt een uitgebreider afwegingschema gebruikt waarin voor meerdere criteria bepaald wordt of de grenswaarden niet overschreden worden. In het afwegingsschema voor het al dan niet aanleggen van een turbotronde (CROW, 2008) wordt een afwegingsschema gehanteerd met daarin diverse criteria voor verkeersafwikkeling, verkeersveiligheid, ruimtelijke inpasbaarheid en verschillende soorten kosten (en baten). Voor het bepalen van het verkeersafwikkelingscriterium wordt aangeraden gebruik te maken van de Meerstrooksrotondeverkenner, welke op basis van de intensiteiten per richting een verzadigingsgraad bepaald voor allerlei (turbo)rotondevormen.

Zowel bij de vuistregels als bij de rekenmethoden wordt veel aandacht besteed aan criteria met betrekking tot de verkeersafwikkeling. Eerder werden al het intensiteitscriterium en de verzadigingsgraad genoemd, maar vaak wordt ook gewerkt met wachttijden, wachtrijen, afrijcapaciteiten, belastingsgraden en conflictbelastingen. Alhoewel er uiteraard de nodige rekenmodellen voor het berekenen van geluidhinder en de uitstoot van schadelijke stoffen zijn, zijn er geen vuistregels op basis van milieucriteria. Criteria ten aanzien van verkeersveiligheid worden vaak in de vorm van voorkeuren in de ontwerpregels verwerkt. In het Handboek Wegontwerp 2012 – Gebiedsontsluitingswegen (CROW, 2012) staat bijvoorbeeld bij de afweging van de kruispuntvorm de volgende tekst:

“Om verkeersveiligheidsredenen heeft de rotonde als kruispuntvorm sterk de voorkeur. Wanneer de verkeersveiligheid of de afwikkelingscapaciteit van een traditioneel voorrangskruispunt te wensen overlaat, moet een afweging worden gemaakt tussen een rotonde of een (uitgebreid) voorrangskruispunt met een verkeersregelinstallatie...Alleen wanneer een rotonde te weinig afwikkelingscapaciteit biedt, kan een kruispunt met een verkeersregelinstallatie worden overwogen.”

Op basis van het bovenstaande voorbeeld is verkeersveiligheid impliciet het belangrijkste criterium en wordt de verkeersafwikkeling als een soort van randvoorwaarde meegenomen. In diverse publicaties (CROW 2012a, 2012b) worden zogenaamde uitgangspunten voor kruispuntvormen geformuleerd, waarin dergelijke voorkeuren voor verschillende situaties verwerkt zijn.

Beperkingen en kansen

Gegeven de huidige ontwerpregels voor kruispunten kan gesteld worden dat er geen eenduidige regels voor alle kruispuntvormen en criteria zijn. Dat geldt zowel voor Nederland als bijvoorbeeld Duitsland, België, Australië, de Verenigde Staten als Groot-Brittannië. Het ontbreken van eenduidigheid heeft betrekking op meerdere aspecten. In de eerste plaats, worden vuistregels en rekenmethoden door elkaar gebruikt. Voor sommige criteria zijn vuistregels beschikbaar, voor andere criteria wordt verwezen naar rekenmethoden. Om meerdere criteria mee te nemen in de afweging van de kruispuntvorm, moet daarom bijna altijd gebruik gemaakt worden van rekenmodellen. Met rekenmodellen kunnen dan wel (beter) de indicatoren voor verschillende criteria bepaald worden, maar zij hebben ook als nadeel dat er meer invoergegevens nodig zijn en het meer tijd kost in de toepassing. Daarnaast moet de gebruiker zelf een aantal inrichtingsvarianten opgeven, waardoor de kwaliteit van de varianten afhangt van het expert judgment van de gebruiker en dus de kans aanwezig is dat de 'beste' oplossing niet gevonden wordt, omdat deze variant niet is bedacht. In de tweede plaats, ontbreekt de eenduidigheid in de regels, omdat veel vuistregels, soms impliciet, voorkeuren voor bepaalde kruispuntvormen bevatten. Deze voorkeuren zijn dan over het algemeen wel gebaseerd op (model)onderzoek, maar ze zijn geen garantie dat de 'beste' oplossing gevonden wordt. In de derde plaats, ontbreekt eenduidigheid, doordat regels criteria bevatten die meerdere beleidsdoelen dienen. De optimale kruispuntvorm uit oogpunt van veiligheid ziet er vaak anders uit dan de optimale kruispuntvorm uit oogpunt van doorstroming of milieu. Door het gebruik van ontwerpregels die meerdere doelen dienen, welke vaak voorkeuren bevatten, bestaat het gevaar dat er onbedoeld meer gewicht aan een bepaald doel gegeven wordt dan gewenst. Dit maakt het bijzonder lastig een afgewogen keuze tussen de verschillende doelen te maken. Overigens worden expliciete criteria ten aanzien van verkeersveiligheid en milieu nog steeds zeer beperkt gebruikt. Een laatste aspect ten aanzien van het ontbreken van eenduidigheid, heeft betrekking op de beperkingen in kruispuntvormen en/of de verschillende regels voor verschillende kruispuntvormen. Dit maakt het lastig een eenduidige afweging van 'alle' kruispuntvormen te maken.

Op basis van de bovenstaande beperkingen vanuit het oogpunt van eenduidigheid kan gesteld worden dat er nog de nodige kansen liggen ten aanzien van het opstellen van vuistregels voor het bepalen van het kruispuntontwerp. Dat er voldoende mogelijkheden zijn voor het verbeteren van de vuistregels toont een studie van Vitins & Axhausen (2012). Zij stellen eenduidige ontwerpregels op, op basis van rekenmethoden volgens de HCM 2010 (TRB, 2010). In tabel 1 wordt een deel van de geformuleerde ontwerpregels getoond.

Totale intensiteit	Aandeel doorgaand verkeer				
	< 20%	< 40%	< 60%	< 80%	< 100%
< 500	0	+	+	+	+
< 1000	0	0	+	+	+
< 1500	0	0	0	+	+
< 2000	0	0	0	0	+
> 2000	0	::	0	0	+

o = rotonde, + = verkeersregelinstallatie, :: = voorrangskruispunt

Tabel 1 – Ontwerpregels voor vierarmige kruispunten (Vitins & Axhausen, 2012).

De ontwerpregels zijn opgesteld op basis van de totale kruispuntvertraging. Er wordt onderscheid gemaakt naar de totale hoeveelheid verkeer op het kruispunt en het aandeel doorgaand verkeer. Daarnaast wordt onderscheid gemaakt naar situaties voor drie- en vierarmige kruispunten. De tabel toont enkel de regels voor vierarmige kruispunten.

Voor de verschillende categorieën wordt een optimale kruispuntvorm, qua kruispuntvertraging, aangeduid. Er wordt onderscheid gemaakt naar rotonde, een voorrangskruispunt en een voorrangskruispunt met een verkeersregelinstallatie. Bij een totale intensiteit van 1600 (pae/h) en een percentage doorgaand verkeer van 70%, wordt een verkeersregelinstallatie geadviseerd.

Naast eenduidigheid is een tweede belangrijke beperking dat de ontwerpregels geformuleerd zijn vanuit de lokale situatie, terwijl kruispunten altijd onderdeel zijn van (stedelijke) netwerken. De keuze voor een kruispuntvorm op de ene locatie kan gevolgen hebben voor de prestatie van kruispunten op andere locaties. Een verkeersregelinstallatie kan bijvoorbeeld een doserende werking hebben, waardoor het verkeer stroomafwaarts ongelijkmatig verdeeld aankomt. Daarnaast is het de vraag wat voor effect het consequent doorvoeren van ontwerpregels heeft op de netwerkprestaties voor verschillende (beleids)doelen. Leveren (lokale) ontwerpregels met als doel het minimaliseren van de kruispuntvertragingen op netwerkniveau ook een optimale prestatie? Wellicht is het beter om op bepaalde locaties te kiezen voor een andere (doserende) kruispuntvorm? Er is meer kennis nodig over de gevolgen van ontwerpregels voor de netwerkprestaties. Zeker als het gaat om meerdere, soms tegenstrijdige, beleidsdoelen. Deze kennis maakt het mogelijk om de ontwerpregels uit te breiden met criteria of randvoorwaarden die gerelateerd zijn aan de positie van het kruispunt in het netwerk.

Samengevat, liggen de kansen bij het opstellen van uitgebreidere en eenduidigere ontwerpregels. Daarbij moet het mogelijk zijn uiteindelijk een inzichtelijke afweging te maken tussen verschillende (beleids)doelen. Als er meer kennis is over de gevolgen van ontwerpregels op netwerkprestaties, dan kunnen netwerk gerelateerde criteria toegevoegd worden aan de ontwerpregels of de mogelijkheden en beperkingen van de toepasbaarheid van de ontwerpregels in stedelijke netwerken worden geformuleerd. In het onderzoek dat in deze paper beschreven wordt, wordt een onderzoeksopzet gepresenteerd dat deze kansen benut.

3. Onderzoeksopzet

De onderzoeksopzet is gebaseerd op het idee dat er eenduidige ontwerpregels voor kruispunten in stedelijke verkeersnetwerken gedefinieerd worden, waarbij rekening gehouden wordt met meerdere beleidsdoelen. De regels zijn bedoeld voor gebruik in Nederland en kunnen worden gebruikt om in een vroegtijdig stadium van het ontwerpproces een optimale kruispuntvorm te bepalen.

Bij het opstellen van de ontwerpregels staat een aantal zaken centraal. In de eerste plaats is het de bedoeling één, eenduidige, set van regels op te stellen voor alle gangbare kruispuntvormen in stedelijke gebieden. Dat houdt in dat er meer kruispuntvormen opgenomen zullen worden dan in de huidige regels (CROW, 2008; 2012a; 2012b). Daarnaast is het de bedoeling meer verklarende variabelen te gebruiken en een gedetailleerdere categorisering aan het houden, zodat er nauwkeurigere adviezen gegeven kunnen worden (vergelijkbaar met Vitins & Axhausen, zie tabel 2). In de tweede plaats is het de bedoeling om ontwerpregels op te stellen voor meerdere beleidsdoelen. Daarbij is de insteek om de regels voor alle doelen afzonderlijk op te stellen, zodat later in het proces een inzichtelijke afweging gemaakt kan worden tussen deze doelen. Voorlopig wordt uitgegaan van een vijftal beleidsdoelen die bijdragen aan het minimaliseren van de (negatieve) externe effecten van verkeer, namelijk; congestie, verkeersongevallen, opwarming van de aarde, geluidhinder en luchtverontreiniging (Van Wee et.al., 2013).

In de derde plaats speelt bij de bepaling, de analyse en het gebruik van de ontwerpregels zowel het (lokale) kruispuntniveau als het netwerkniveau een rol. Dit geldt zowel voor het bepalen van de prestaties van de ontwerpregels als voor het bepalen van de criteria voor de ontwerpregels zelf. Op kruispuntniveau gaat het om criteria gerelateerd aan de verkeersvraag, zoals de totale intensiteit, het aandeel doorgaand verkeer of het aantal overstekende voetgangers. Op netwerkniveau gaat het om criteria gerelateerd aan de positie van het kruispunt in het netwerk, zoals het type van aangrenzende wegen en kruispunten of karakteristieken van een route waarop het kruispunt ligt. Samengevat, gaat het dus om meer verklarende variabelen en kruispuntvormen, meerdere beleidsdoelen en meerdere niveaus.

Om de nieuwe ontwerpregels te bepalen, testen en toepassen is gekozen voor een modelmatige benadering. Daarbij worden de volgende stappen doorlopen:

1. Leid ontwerpregels voor kruispunten af op basis van lokale kruispuntcriteria
2. Bepaal de netwerkprestaties van ontwerpregels
3. Bepaal de optimale netwerkontwerpen
4. Breid de ontwerpregels uit op basis van netwerkcriteria
5. Ontwikkel en pas een beslissingsondersteunend instrument toe

Stap 1 - Leid ontwerpregels voor kruispunten af op basis van lokale kruispuntcriteria

De eerste stap betreft het afleiden van nieuwe ontwerpregels voor kruispunten op basis van het modelleren en analyseren van de prestaties van geïsoleerde kruispunten.

Met behulp van een modelsysteem wordt een dataset gegenereerd met als input een grote verscheidenheid aan kruispuntontwerpen en verkeersvraag en als output de prestatieparameters gerelateerd aan de vijf belangrijkste (negatieve) effecten van verkeer; congestie, verkeersongevallen, opwarming van de aarde, luchtverontreiniging en geluidhinder. De kruispuntontwerpen worden gevarieerd op basis van het kruispunttype (bijvoorbeeld (turbo)rotonde, gelijkwaardig, geregeld, voorrang of ongelijkvloers) en andere ontwerpvariabelen zoals het aantal en de configuratie van de (opstel)stroken, de instellingen van een eventuele verkeersregelininstallatie en de voorrangregeling van voetgangers en fietsers.

De verkeersvraag wordt gevarieerd in het totaal op een kruispunt, de verdeling van de stromen over het kruispunt, het percentage (zwaar) vrachtverkeer en het aantal overstekende fietsers en/of voetgangers. Op basis van de resultaten van het modelsysteem kunnen voor elke kruispuntontwerp-verkeersvraagcombinatie de optimale kruispuntontwerpen voor alle individuele doelen afzonderlijk bepaald worden. Deze gegevens worden gebruikt om nieuwe ontwerpregels te bepalen, zoals eerder weergegeven in tabel 2. In dat voorbeeld, op basis van het werk van Vitins & Axhausen (2012) worden de ontwerpregels in de vorm van een matrix weergegeven. Een meer hiërarchische structuur is echter ook denkbaar.

Het modelsysteem bestaat in deze stap uit een kruispuntmodel gekoppeld aan effectmodellen. Het kruispuntmodel berekent de verkeersafwikkeling op het kruispunt op basis van een gegeven kruispuntontwerp en verkeersvraag. Het model levert onder andere capaciteiten, vertragingen en wachtrijen. De effectmodellen berekenen de prestatieparameters voor congestie, verkeersonveiligheid, opwarming van de aarde, luchtverontreiniging en geluidhinder op basis van deze berekende verkeersafwikkeling. Voor het berekenen van de verkeersafwikkeling is een groot aantal methoden en modellen beschikbaar, variërend van macroscopische analytische modellen tot en met microscopische simulatiemodellen.

In dit onderzoek is het de bedoeling dat het kruispuntmodel, in volgende stappen, ook gebruikt gaat worden binnen een toedelingsmodel (ter bepaling van de resultaten op netwerkniveau), dat op zijn beurt weer gebruikt wordt binnen een optimalisatieraamwerk. Als gevolg daarvan, zijn alleen snelle macroscopische analytische methoden als kruispuntmodel bruikbaar. De uiteindelijke keuze voor het kruispuntmodel en de effectmodellen wordt gedaan op basis van een literatuurstudie. Voorlopig wordt uitgegaan van het kruispuntmodel dat gebruikt wordt binnen het verkeersmodelleringspakket OmniTRANS. Voor de effectmodellen wordt voortgeborduurd op het werk van Wismans (2012).

Stap 2 – Bepaal de netwerkprestaties van ontwerpregels

De tweede stap betreft het bepalen en analyseren van de netwerkprestaties van de ontwerpregels voor kruispunten. De in de vorige stap ontwikkelde ontwerpregels op basis van (lokale) kruispuntcriteria worden toegepast op alle kruispunten in het netwerk.

Met behulp van een modelsysteem wordt een dataset gegenereerd met als input de ontwerpregels voor kruispunten op basis van de (lokale) kruispuntcriteria, diverse synthetische netwerken en sets met verkeersvraag en als output de kruispuntontwerpen en de netwerkprestaties, wederom gerelateerd aan de vijf belangrijkste negatieve effecten van verkeer. De netwerkprestaties zijn in essentie eenvoudigweg een sommatie van de kruispuntprestaties op netwerkniveau. De synthetische netwerken worden gevarieerd in grootte, structuur en dichtheid. De sets met verkeersvraag, de herkomst-bestemmingsmatrices, worden gevarieerd naar de totale verkeersomvang en de verdeling over het netwerk. De ontwerpregels (per doel) zijn afkomstig uit de vorige onderzoeksstap. Daarnaast worden ontwerpregels op basis van de bestaande ontwerprichtlijnen en extreme ontwerpregels zoals overal rotondes meegenomen in de vergelijking. Elke set van ontwerpregels resulteert in een netwerk met kruispuntontwerpen met bijbehorende netwerkprestaties. De kruispuntontwerpen en netwerkprestaties worden per doel en set van regels met elkaar vergeleken. Op basis van deze informatie ontstaat inzicht in de netwerkeffecten van de ontwerpregels voor kruispunten en verschillen voor de verschillende (beleids)doelen.

Het modelsysteem bestaat in deze stap uit een zogenaamde regelimplementatiemethode en een toedelingsmodel. De implementatiemethode draagt zorg voor de implementatie van de ontwerpregels voor kruispunten. Op basis van een initieel netwerkontwerp met kruispunten en een toedelingsresultaat worden de kruispuntontwerpen aangepast op basis van de ontwerpregels. De resultaten dienen als input voor het toedelingsmodel. Aangezien een aanpassing van de kruispuntontwerpen in de meeste gevallen tot een ander toedelingsresultaat zal leiden, hetgeen weer andere kruispuntontwerpen vereist, zal gebruik gemaakt worden van een iteratief proces. De ontwikkeling en de convergentie van deze procedure is één van de uitdagingen in dit onderzoek.

Voor het toedelingsmodel, wordt gebruik gemaakt van een macroscopisch model, uiteraard inclusief het kruispuntmodel en de effectmodellen. De noodzaak voor een macroscopisch model, in vergelijking met een meso- of microscopisch model komt voort uit de beperkingen van de laatste twee ten aanzien van de rekentijd- en capaciteit. Omdat het voor een juiste bestudering van de effecten van het kruispuntontwerp op de verkeersafwikkeling in netwerken van belang is dat het zogenaamde terugslag-effect van wachtrijen op stroomopwaarts gelegen kruispunten meegenomen wordt, wordt gezocht naar een toedelingsmodel dat daarin voorziet. Vooralsnog, wordt gebruik gemaakt van het recent ontwikkelde model STAQ (Bredereode et.al. 2010; Bliemer et.al. 2012).

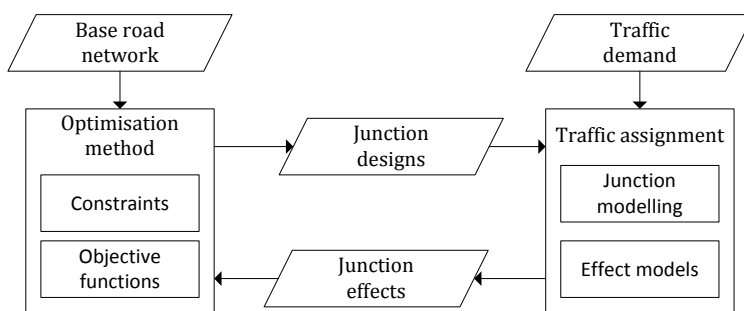
In dit onderzoek wordt daarnaast enkel gekeken naar gedragswijzigingen in de routekeuze van autoverkeer, die gebaseerd is op reistijd. Vanwege de complexiteit van het modelsysteem en de verwachte beperkte impact op gedragswijzigingen in de vervoerswijze- en bestemmingskeuze worden deze effecten achterwege gelaten.

Stap 3 – Bepaal de optimale netwerkontwerpen

De derde stap betreft het bepalen en analyseren van de optimale inrichting van het kruispuntontwerp op netwerkniveau.

Met behulp van een modelsysteem wordt een dataset gegenereerd met als input een set met mogelijke kruispuntontwerpen, diverse synthetische netwerken en sets met verkeersvraag en als output de optimale kruispuntontwerpen per (beleids)doel. Voor elke combinatie van netwerk en verkeersvraag wordt, met behulp van een optimalisatiemodel, voor elk doel bepaald welke combinatie van kruispuntontwerpen in het netwerk op netwerkniveau de beste prestatie op netwerkniveau geeft. Dus bijvoorbeeld welke combinatie van kruispuntontwerpen een minimum aantal voertuigverliesuren of de minste uitstoot van fijn stof oplevert. De resultaten worden per doel vergeleken met de kruispuntontwerpen en netwerkprestaties op basis van de ontwerpregels uit de vorige stap. Op basis van deze informatie kan beoordeeld worden in hoeverre de ontwerpregels op basis van lokale ontwerpcriteria bijdragen aan het minimaliseren van de negatieve effecten van verkeer op netwerkniveau. Daarnaast worden de ontwerpen en prestaties van de doelen onderling geanalyseerd, zodat inzicht ontstaat in de trade-off tussen de verschillende doelen.

Het modelsysteem bestaat in deze stap uit een modelleringsraamwerk met een toedelingsmodel, een kruispuntmodel, effectmodellen en een optimalisatiemethode. Het optimalisatieraamwerk is geformuleerd als een bi-level optimalisatieprobleem. Op het hogere niveau trachten wegbeheerders (of beleidsmakers) het systeem te optimaliseren op basis van doelen ten aanzien van het minimaliseren van congestie, verkeersongevallen, opwarming van de aarde, luchtverontreiniging en geluidhinder. Terwijl op het lagere niveau individuele weggebruikers trachten hun eigen doelen te optimaliseren (minimaliseren reistijd). Het lagere niveau bestaat daarmee uit een toedelingsmodel, inclusief een kruispuntmodel en effectmodellen. Dit optimalisatieraamwerk wordt weergegeven in figuur 1.



Figuur 1 – Optimalisatieraamwerk.

Het toedelingsmodel, inclusief het kruispuntmodel en de effectmodellen is hetzelfde als in de vorige stap. De methode voor het optimalisatiemodel wordt overgenomen van Wismans (2012) en Brands & Van Berkum (2012). Op basis van literatuurstudie zullen keuzes gemaakt moeten worden ten aanzien van de doelfuncties en het gebruik van eventuele randvoorwaarden zoals beperkingen met betrekking tot kosten.

Stap 4 – Breid de ontwerpregels uit op basis van netwerkcriteria

De vierde stap betreft het uitbreiden van de ontwerpregels voor kruispunten op basis van zogenaamde netwerkcriteria.

Op basis van de datasets en inzichten uit de voorgaande twee stappen worden de ontwerpregels voor kruispunten op basis van gegevensanalyses, zo mogelijk, uitgebreid met zogenaamde netwerkcriteria. Netwerkcriteria hebben betrekking op de kenmerken van het netwerk waarin het kruispunt(ontwerp) zich bevindt, zoals bijvoorbeeld het wegtype van de aangrenzende wegen, de aangrenzende kruispunttypen en kenmerken van de route waarvan het kruispunt onderdeel uitmaakt. Voor de wegtypering wordt in ieder geval gebruik gemaakt van de wegcategorieën en -typen volgens Duurzaam Veilig, zoals stroomwegen, gebiedsontsluitingswegen en erftoegangswegen, maar er kan ook gedacht worden aan een indeling gerelateerd aan de capaciteit, het aantal stroken en de snelheidslimiet. Bij routekenmerken wordt bijvoorbeeld gedacht aan het feit of het kruispunt onderdeel uitmaakt van een hoofduitvalsweg, ringweg of een bus-, (hoofd)fiets- of parkeerroute. De kenmerken dienen als wegvak- en kruispuntlabels beschikbaar te zijn in de synthetische netwerken die gebruikt zijn in de vorige twee stappen. Met behulp van multivariate statistische en datamining methoden wordt in de data gezocht naar patronen/verbanden. Uiteindelijk, zal het introduceren van netwerkcriteria vermoedelijk in veel gevallen eerder een vereenvoudiging dan een uitbreiding van de ontwerpregels te weeg brengen. Bijvoorbeeld als blijkt dat bij het kruisen van twee specifiek wegtypen een bepaald kruispuntontwerp altijd beter scoort, ongeacht de totale hoeveelheid verkeer op het kruispunt en/of het percentage doorgaand verkeer. De uitgebreide ontwerpregels worden getest met behulp van de modelsystemen uit de voorgaande twee stappen.

Ook deze stap resulteert in ontwerpregels voor elk doel afzonderlijk (tenzij uit de vorige stap blijkt dat bepaalde doelen zeer goed te combineren zijn).

Stap 5 – Ontwikkel en pas een beslissingsondersteunend instrument toe

De vijfde en laatste stap betreft het ontwikkelen en testen van een beslissingsondersteunend instrument met betrekking tot de inrichting van kruispunten in stedelijke netwerken, waarbij gewerkt wordt met meerdere (beleids)doelen.

Op basis van de eerste vier stappen zijn ontwerpregels voor kruispunten in stedelijke netwerken ontwikkeld. Er zijn ontwerpregels voor elk (beleids)doel afzonderlijk. In het beslissingsondersteunend instrument gaat het er om dat de ontwerpregels toegepast kunnen worden op een realistisch netwerk en in een realistische beleids- en beslissituatie. Het gaat er om dat met behulp van de ontwerpregels beslissingen gemaakt kunnen worden over de inrichting van de kruispunten in een stedelijk netwerk, bijvoorbeeld om prioriteiten te stellen met betrekking tot de investeringen in het aanpassen of aanleggen van kruispunten. Daarbij moet rekening gehouden kunnen worden met meerdere, vaak tegenstrijdige, (beleids)doelen. In het instrument dient inzichtelijk gemaakt te worden wat voor gevolgen beleidsvoorkeuren/-keuzes hebben voor de inrichting van het netwerk. Voorlopig wordt er vanuit gegaan dat het instrument toegepast zal worden voor het stedelijke netwerk van Zwolle.

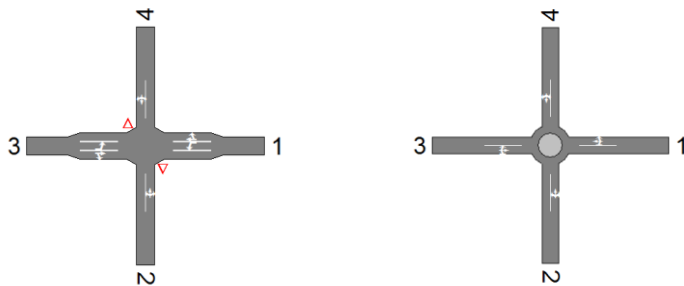
4. Een eerste uitwerking

Om de onderzoeksopzet, zoals beschreven in paragraaf 3, te illustreren, wordt in deze paragraaf een eerste uitwerking op basis van een theoretisch voorbeeld beschreven. In het voorbeeld wordt aandacht besteed aan de stappen 1 en 3 van de onderzoeksopzet. Er is gekozen voor deze stappen, omdat ze de kern van het onderzoek het beste illustreren.

Voor stap 1 wordt een ontwerpregel bepaald voor één (beleids)doel, zijnde het minimaliseren van congestie. Als indicator wordt het aantal voertuigverliesuren op het kruispunt gebruikt. Voor stap 3 worden de netwerkprestaties, zijnde voertuigverliesuren, bepaald voor een synthetisch netwerken met vier herkomst-bestemmingsparen en drie kruispunten. Zowel in stap 1 als stap 3 wordt onderscheid gemaakt tussen twee kruispunttypen, zijnde een voorrangskruispunt of een (enkelstrooks)rotonde. Voor het berekenen van de kruispuntprestaties wordt gebruik gemaakt van het kruispuntmodel binnen OmniTRANS. Als toedelingstechniek wordt een zogenaamde volume-averaging toedeling met kruispuntmodellering gebruikt. Omdat er gekozen is voor een klein netwerk en beperkt aantal kruispunten en kruispuntontwerpen, is het mogelijke alle ontwerp oplossingen door te rekenen. Hierdoor is er in dit geval geen optimalisatiemethode nodig.

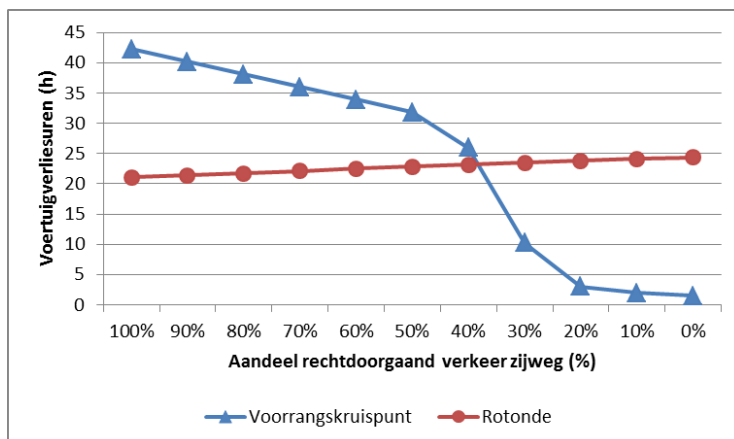
Stap 1 – Bepaal de ontwerpregels op basis van kruispuntcriteria

Voor een kruispunt met vier armen worden de prestaties van twee kruispunttypen met elkaar vergeleken, een voorrangskruispunt (met linksafvakken op de hoofdweg) en een (enkelstrooks)rotonde (zie figuur 2). De weg tussen de armen 1 en 3 wordt als hoofd- of voorrangsweg aangehouden.



Figuur 2 – Kruispunttypen, voorrangskruispunt (links) en rotonde (rechts).

Vervolgens zijn voertuigverliesuren bepaald voor verschillende verdelingen van de verkeersvraag over de twee kruispuntvormen. In eerste instantie wordt uitgegaan van 1000 pae/uur van arm 1 naar 3 en vice versa. Op de zijweg wordt 250 pae/uur per arm aangehouden, waarbij gevarieerd wordt met het aandeel rechtdoorgaand verkeer. In plaats van rechtdoor van arm 2 naar 4 (en vice versa) gebruikt het verkeer dan de armen 1 en 2. Het verkeer vanaf de zijweg slaat dan rechtsaf (van 2 naar 1). Het (extra) verkeer vanaf de hoofdweg slaat dan linksaf (van 1 naar 2). In figuur 3 worden de resultaten van de berekeningen getoond.



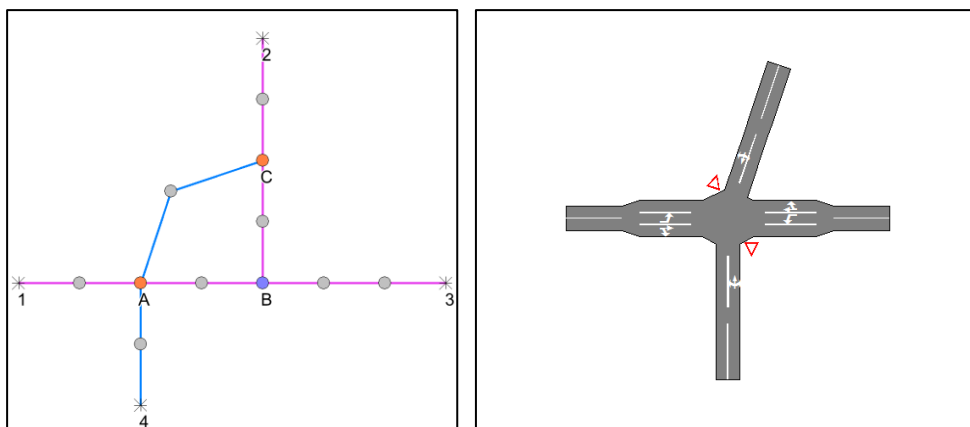
Figuur 3 – Voertuigverliesuren bij verschillende aandelen rechtdoorgaand verkeer op de zijweg (totale verkeersvraag = 2500 pae/uur).

Tot een aandeel van 40% rechtdoorgaand verkeer van/naar de zijweg levert een rotonde de beste prestaties (minste voertuigverliesuren). Daarna levert een voorrangskruispunt minder voertuigverliesuren op. Op basis van deze informatie kan een ontwerpregel opgesteld worden, waarbij bij meer dan 40% rechtdoorgaand verkeer van/naar de zijweg een rotonde toegepast wordt, terwijl bij minder dan 40% een voorrangskruispunt ingepast wordt. In dit geval is uitgegaan van een totale verkeersvraag van 2500 pae/uur op het kruispunt. Bij een totale verkeersvraag van 2000 pae/uur, waarvan wederom 500 pae/uur op de zijweg, ontstaat een overeenkomstig beeld. Bij een totale verkeersvraag van 1500 pae/uur (500 pae/uur op zijweg) ontstaat een ander beeld. In een dergelijke situatie presteert een voorrangskruispunt altijd beter.

Uiteindelijk zullen in de uitwerking van stap 1, veel meer kruispuntvormen, verkeersvraagvarianten en criteria worden meegenomen om te komen tot ontwerpregels. Dit voorbeeld illustreert echter één van de vele mogelijkheden voor het opstellen van ontwerpregels voor kruispunten.

Stap 3 – Bepaal de optimale netwerkontwerpen

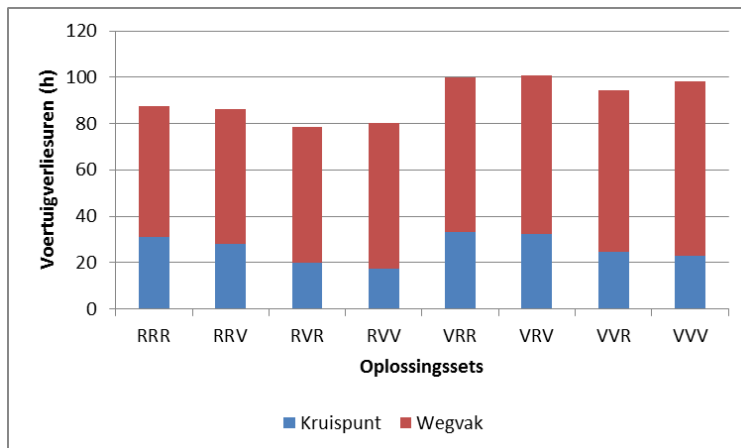
Voor stap 3 is gekozen voor een synthetisch netwerk met vier herkomst-bestemmingsparen en drie kruispunten. Tussen de HB-paren 1 en 3 is de verkeersvraag in beide richtingen 1000 pae/uur. Tussen de HB-paren 2 en 4 is dat 250 pae/uur. Voor de route tussen de laatste twee paren zijn twee mogelijkheden, een route met en een route zonder kruispunt B. De roze gekleurde wegen zijn altijd hoofd- of voorrangsweg. In figuur 4 wordt het netwerk getoond. De figuur toont ook een voorbeeld van de definitie van kruispunt A. Voor elk kruispunt kan er gekozen worden tussen een voorrangskruispunt en een rotonde. In totaal zijn er dus $2^3=8$ mogelijke inrichtingen (oplossingssets) van het netwerk.



Figuur 4 – Synthetische netwerk met vier herkomst-bestemmingen en drie kruispunten (links) en kruispuntdefinitie van kruispunt A (rechts).

In figuur 5 worden de prestaties van de verschillende oplossingssets getoond. Daarbij is onderscheid gemaakt naar voertuigverliesuren gemaakt op kruispunten en voertuigverliesuren gemaakt op wegvakken. De laatste is gebaseerd op verliestijden per wegvak (vertraging op basis van een BPR-functie minus de free-flow reistijd). De optimale inrichting, met de minste voertuigverliesuren, is de oplossingsset met twee rotonde (kruispunt A en C) en één voorrangskruispunt (kruispunt B). In tabel 3 wordt een nadere specificatie van de prestaties van de verschillende oplossingssets getoond. Hierin is eveneens te zien dat oplossingsset 3 met {RVR} het beste scoort met 78,7 voertuigverliesuren. In de tabel is ook te zien dat dit niet de oplossing is met de minste verliesuren op kruispunten, dat is set {RVV} met 17,2 VVU.

Zelfs niet met de minste verliezen op wegvakken ($\{RRR\}$ met 56,5 VVU). De combinatie levert echter wel het minste aantal verliezen op.



Figuur 5 – Netwerkprestatie in voertuigverliesuren voor de oplossingssets.

Nr	kruispunt A		Kruispunt B		Kruispunt C		Kruispunt	Wegvak	Totaal
	Type	VVU	Type	VVU	Type	VVU	VVU	VVU	VVU
1	R	21,21	R	8,22	R	1,74	31,17	56,46*	87,63
2	R	18,64	R	8,67	V	0,68	27,99	58,12	86,11
3	R	18,16	V	0,06*	R	1,74	19,96	58,73	78,69*
4	R	16,67*	V	0,08	V	0,42	17,17*	63,07	80,24
5	V	22,19	R	9,13	R	1,76	33,08	66,68	99,76
6	V	22,19	R	9,62	V	0,64	32,45	68,34	100,79
7	V	21,96	V	0,71	R	1,76	24,43	69,95	94,38
8	V	21,83	V	0,78	V	0,37*	22,98	75,34	98,32

Tabel 3 – Netwerk- en kruispuntprestaties voor de oplossingssets.

Als naar de individuele kruispunten gekeken wordt, dan scoort voor kruispunt A een rotonde altijd beter dan een voorrangskruispunt. Dat is ook niet zo gek, want de totale verkeersvraag op het kruispunt is 2500 en het aandeel rechtdoorgaand verkeer ligt telkens boven de 40%. Voor de kruispunten B en C geldt dat door de beperktere hoeveelheid verkeer een voorrangskruispunt altijd beter scoort. Dit komt overeen met de in stap 1 geformuleerde ontwerpregels.

De optimale oplossingsset bevat voor kruispunt C echter een rotonde. Het kruispunttype heeft, door haar invloed op de reistijd, invloed op de routekeuze. De toepassing van een rotonde voor kruispunt C zorgt in dit geval voor een gunstigere verdeling van het verkeer over het netwerk, waardoor het totaal aantal voertuigverliesuren voor deze situatie minimaal is. Dit illustreert enigszins het belang van onderzoek naar de netwerkeffecten van ontwerpregels.

5. Voortgang

Het onderzoek dat beschreven wordt in deze paper, wordt uitgevoerd in de vorm van een promotieonderzoek aan de Universiteit Twente en wordt gefinancierd door de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek en de Hogeschool Windesheim. Op dit moment (augustus 2013) is gestart met de ontwikkeling van het modelsysteem voor stap 1 van het onderzoek. Tijdens de presentatie op het CVS-congres worden de eerste resultaten van deze stap getoond.

Referenties

AASHTO (2011) A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 6th edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.

Austrouds (2009/2010) Guide to Road Design, Parts 4, 4A, 4B, 4C, Austrouds, Sydney.

Brederode, L.J.N., Bliemer, M.C.J. and Wismans, L.J.J. (2010) STAQ: Static traffic assignment with queuing, In: Proceedings European Transport Conference (ETC), 2010, Glasgow.

Bliemer, M.C.J., Brederode, L.J.N., Wismans, L.J.J. and E.S. Smits (2012) Quasi-dynamic network traffic assignment: static traffic assignment with queuing and spillback, In: Proceedings 92th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C.

Brands, T. and E.C. van Berkum (2010) Optimalisatie van het multimodale vervoersnetwerk in de Randstad, rekening houdend met meerdere doelstellingen, paper gepresenteerd op het CVS, November 2010, Roermond.

CROW (1998) Eenheid in rotondes, Publicatie 126, CROW, Ede.

CROW (2008) Turborotondes, Publicatie 257, CROW, Ede.

CROW (2012) ASVV 2012 – Aanbevelingen voor verkeersvoorzieningen binnen de bebouwde kom, Publicatie 723, CROW, Ede.

CROW (2012) Handboek Wegontwerp 2012, Publicaties 164A-D, CROW, Ede.

FGSV (2007) Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen: RAS 06, 200, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Keulen.

Highways Agency (2012) Design Manual for Roads and Bridges (DMRB), Online versie juni 2012, Highways Agency, London.

Slop, M. (1975) Criteria voor het aanbrengen van verkeerslichten, Verkeerskunde.

Transportation Research Board (2010) Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, Washington D.C.

Vitens, B.J. and K.W. Axhausen (2012) Shape Grammars for Intersection Type Choice in Road Network Generation, paper gepresenteerd op 12th Swiss Transport Research Conference, Ascona, mei 2012.

Van Wee, B., J.A. Annema and D. Banister (2013) The Transport System and Transport Policy: An Introduction, Edward Elgar Publishing Limited, Cheltenham.

Wismans, L.J.J. (2012) Towards Sustainable Dynamic Traffic Management, proefschrift, Universiteit Twente, Enschede.