

Macroscopische kruispuntmodellering: dataverzameling en kalibratie

Griet Werbrouck

Thesis voorgedragen tot het behalen
van de graad van Master of Science in
de ingenieurswetenschappen:
verkeer, logistiek en intelligente
transportsystemen, optie Logistiek en
transport

Promotoren:

Prof. dr. ir. Chris Tampère

Prof. dr. ir. Serge Hoogendoorn

Assessor:

Dr. Victor Knoop

Begeleider:

Dr. ir. Ruben Corthout

Academiejaar 2012 - 2013

© Copyright door KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wend u tot de KU Leuven, Faculteit Ingenieurswetenschappen - Kasteelpark Arenberg 1, B-3001 Heverlee (België). Telefoon +32-16-32 13 50 & Fax. +32-16-32 19 88.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in dit afstudeerwerk beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

© Copyright by KU Leuven

Without written permission of the supervisor(s) and the authors it is forbidden to reproduce or adapt in any form or by any means any part of this publication. Requests for obtaining the right to reproduce or utilize parts of this publication should be addressed to KU Leuven, Faculty of Engineering Science - Kasteelpark Arenberg 1, B-3001 Heverlee (Belgium). Telephone +32-16-32 13 50 & Fax. +32-16-32 19 88.

A written permission of the supervisor(s) is also required to use the methods, products, schematics and programs described in this work for industrial or commercial use, and for submitting this publication in scientific contests.

Voorwoord

Na de inspanningen van het voorbije academiejaar, vormt deze masterproef het hoogtepunt en meteen ook het eindpunt van mijn studies aan de K.U. Leuven. Dit werk is tot stand gekomen dankzij de hulp en steun van heel wat mensen. Vandaar dat enkele bedankingen hier toch gepast zijn.

Eerst en vooral wil ik mijn promotor professor Chris Tampère bedanken voor het aanreiken en begeleiden van mijn onderwerp. Vervolgens bedank ik ook graag Ruben Corthout voor de dagelijkse ondersteuning en de snelle reactie op al mijn vragen en problemen. De vele gedetailleerde formuleringen van feedback en kritische vragen hebben me zelf meer doen nadenken over de materie en tot een beter inzicht gebracht.

Ook professor Serge Hoogendoorn en Victor knoop van de TU Delft wil ik graag bedanken voor de technische ondersteuning. Dankzij de professionele en efficiënte aanpak, zijn de metingen in Delft heel vlot verlopen en is het voor mij een heel aangename ervaring geweest.

Ten slotte wil ik ook mijn kotgenootjes, zus en ouders en vriend bedanken voor de morele steun. Zonder een luisterend oor en de nodige aanmoedigingen was ik immers wellicht niet tot dit punt gekomen.

Bedankt!

Griet Werbrouck

Inhoudsopgave

Voorwoord	iii
Inhoudsopgave	v
Abstract	ix
Lijst van figuren en tabellen	xi
Lijst van figuren	xi
Lijst van tabellen	xiii
Lijst van afkortingen en symbolen	xv
Hoofdstuk 1: Introductie	1
Hoofdstuk 2: Algemene literatuurstudie, onderzoeksvraag en onderzoeksaanpak	3
2.1 Onderzoeksdomein: Macroscopische kruispuntmodellering	3
2.1.1 Dynamic Traffic Assignment (DTA) model	3
2.1.2 Dynamic Network Loading (DNL) model	4
2.2 Het knooppmodel	4
2.2.1 Functies van het knooppmodel	4
2.2.2 Types knooppmodellen	5
2.2.3 Bestudeerde knooppmodel	6
2.3 Onderzoeksvraag en aanpak	7
2.3.1 Doelstellingen	7
2.3.2 Aanpak	7
Hoofdstuk 3: Specifieke literatuurstudie over bestudeerde knooppmodel	8
3.1 Opbouw van het model: externe en interne beperkingen	8
3.1.1 Externe beperkingen	8
3.1.2 Interne beperkingen	10
3.1.3 Invulling van de α_{ij} en α_{ik} parameters	12
3.2 Niet-unieke aard van de oplossing	13
3.3 Praktische methode om tot een unieke oplossing te komen	14

3.4 Besluit	15
Hoofdstuk 4: Gevalstudie	16
4.1 Keuze van het bestudeerde kruispunt	16
4.2 Modelweergave van het kruispunt.....	17
4.3 Meetplan en tellingen	19
4.4 Besluit	20
Hoofdstuk 5: Algemene aanpak van de kalibratie	21
5.1 Parameters binnen het knooppunt.....	21
5.2 Opbouw kalibratiemodel.....	22
5.2.1 Structuur van het kalibratiemodel	22
5.2.2 Optimalisatiealgoritme: fmincon.....	23
5.2.3 Doelfunctie.....	24
5.2.4 Hoe kwaliteit van de fit beoordelen	26
5.3 Aanpak.....	27
5.4 Besluit	28
Hoofdstuk 6: Kalibratie van het testscenario	29
6.1 Opstellen van het testscenario	29
6.1.1 Algemeen overzicht van het scenario en werkwijze	29
6.1.2 Berekenen van testscenario	30
6.2 Keuze van de doelfunctie.....	32
6.3 Kalibratie van bovenliggend model	35
6.3.1 Kalibratie van α_i	35
6.3.2 Kalibratie van α_i en t_{ik}	37
6.3.3 Besluit	39
6.4 Kalibratie van het onderliggend model.....	39
6.4.1 Kalibratie van α_{ij} en α_{ik}	39
6.4.2 Kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik}	41
6.4.3 Kalibratie van w_{ij} en w_{ik}	43
6.4.4 Kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik}	45
6.4.5 Besluit	46
6.5 Besluit	48
Hoofdstuk 7: Kalibratie van bestudeerde kruispunt	49
7.1 Selectie van data voor analyse	49
7.2 Keuze van vaste parameterwaarden.....	50

7.3 Kalibratie van bovenliggend model	51
7.3.1 Kalibratie van α_i	51
7.3.2 Kalibratie van α_i en t_{ik}	55
7.3.3 Besluit	57
7.4 Kalibratie van onderliggend model	57
7.4.1 Kalibratie van α_{ij} en α_{ik}	58
7.4.2 Kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik}	60
7.4.3 Kalibratie van w_{ij} en w_{ik}	63
7.4.4 Kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik}	64
7.4.5 Besluit	68
7.5 Besluit	69
Hoofdstuk 8: Lessen voor een toekomstige kalibratie/validatie	71
8.1 Voorwaarden voor een eenduidige oplossing	71
8.1.1 Bovenliggend niveau	71
8.1.2 Onderliggend niveau	72
8.2 Validiteit van het kruispuntmodel	72
8.3 Hoe een kalibratie/validatie uit te voeren in de toekomst	73
Hoofdstuk 9: Besluit	75
Appendices	77
Appendix A: Manueel narekenen van het testscenario	78
Appendix B: Waarden voor w_{ij} en w_{ik} per tijdstap (kalibratie testscenario)	84
Appendix C: Waarden voor w_{ij} en w_{ik} per tijdstap (kalibratie metingen)	85
Appendix D: Analyse van α_i parameters bij kalibratie testscenario	87
Appendix E: Analyse van α_i parameters bij kalibratie metingen	91
Bibliografie	96

Abstract

Het opzetten van een kruispuntmodel dat voldoet aan de zeven voorwaarden, geformuleerd in Corthout (2012) [1] en rekening houdt met zowel interne als externe beperkingen, kan leiden tot het bestaan van meerdere oplossingen. Corthout (2012) stelt een knoopmodel en bijhorende praktische methode voor die toch een unieke oplossing garandeert. Deze masterproef poogt de parameters van dit knoopmodel te kalibreren en zo de validiteit van het model na te gaan. Hiervoor wordt dan ook een dataverzameling georganiseerd.

In het bovenliggende kalibratiemodel worden de voorrangsparements, eigen aan de ingaande schakels, gekalibreerd enerzijds met en zonder de bezettijden. Uit onderzoek blijkt dat de verhouding tussen de voorrangsparements van de ingaande schakels enkel bepaald kan worden indien op deze schakels een vraagoverschot aanwezig is. Wat betreft de kalibratie van de bezettijden, is duidelijk geworden dat de theoretische formule niet goed functioneert wanneer de hoofdstroom niet gekenmerkt is door een vraagoverschot.

Experimenten waarbij bezettijden, voorrangsparements en gewichten op het onderliggende niveau afwisselend gekalibreerd worden, tonen aan dat deze parameters niet altijd eenduidig bepaald zijn. De configuratie van het kruispunt en de hoeveelheid beschikbare data bepalen de grootte van de oplossingsruimte. Bij de kalibraties van enerzijds de voorrangsparements en anderzijds de gewichten op basis van de metingen, blijkt dat deze een even goede en aanvaardbare fit geven van de uitstroom. Toch is er een algemene voorkeur voor een kalibratie van de voorrangsparements. Deze zijn immers niet afhankelijk van afslagfracties en dus ook tijdsinvariant. Bovendien zijn deze ook intuïtief makkelijker te interpreteren dan de gewichten.

Bij kalibraties in de toekomst is het aan te raden om een dataset te gebruiken waarin alle ingaande schakels die strijden om een beperkt aanbod, met een vraagoverschot zitten. Op die manier kan de ratio van de bovenliggende parameters van het betreffende conflictpunt eenduidig bepaald worden. Voor een succesvolle kalibratie is het ook voordelig om een dataset te hebben waarin een variëteit aan beperkingen op verschillende momenten actief zijn. Ten slotte moet bij het kalibreren voldoende aandacht besteed worden aan de keuze voor de bezettijden. Deze zijn immers verkeersafhankelijk.

Lijst van figuren en tabellen

Lijst van figuren

Figuur 1: aanduiding van conflictzones op een 4x4 kruispunt (Brilon & Wu, 2001) [5]	12
Figuur 2: illustratie van meerdere oplossingen voor het knooppuntmodel [1]	14
Figuur 3: satellietbeeld van kruispunt	16
Figuur 4: werkelijke configuratie kruispunt	18
Figuur 5: modelconfiguratie	18
Figuur 6: prestatie van verschillende doelfuncties voor kalibratie van α_i en t_{ik} (zwart=basisfunctie, rood=variant 1, blauw=variant 2, groen=variant 3)	33
Figuur 7: prestatie van verschillende doelfuncties voor kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} (zwart=basisfunctie, rood=variant 1, blauw=variant 2, groen=variant 3)	34
Figuur 8: prestatie van verschillende doelfuncties voor kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} (zwart=basisfunctie, rood=variant 1, blauw=variant 2, groen=variant 3)	34
Figuur 9: uitstroom in- en uitgaande schakels voor tijdstap 1 tot 5 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)	54
Figuur 10: uitstroom in- en uitgaande schakels voor tijdstap 6 tot 10 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)	54
Figuur 11: Uitstroom in- en uitgaande schakels voor tijdstap 1 tot 5 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)	56
Figuur 12: Uitstroom in- en uitgaande schakels voor tijdstap 6 tot 10 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)	57
Figuur 13: uitstroom in- en uitgaande schakels voor tijdstap 1 tot 5 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)	59

Figuur 14: uitstroom in- en uitgaande schakel voor tijdstap 6 tot 10 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom).....	60
Figuur 15: uitstroom in- en uitgaande schakel voor tijdstap 1 tot 5 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom).....	62
Figuur 16: uitstroom in- en uitgaande schakel voor tijdstap 6 tot 10 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom).....	62
Figuur 17: uitstroom in- en uitgaande schakels voor tijdstap 1 tot 5 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom).....	67
Figuur 18: uitstroom in- en uitgaande schakels voor tijdstap 6 tot 10 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom).....	67
Figuur 19: tijdstap 1 van testscenario	79
Figuur 20: tijdstap 2 van testscenario	80
Figuur 21: tijdstap 3 van testscenario	81
Figuur 22: tijdstap 4 van testscenario	82
Figuur 23: tijdstap 5 van testscenario	83

Lijst van tabellen

Tabel 1: resultaten kalibratie α_i op testscenario.....	37
Tabel 2: resultaten kalibratie α_i en t_{ik} op testscenario.....	38
Tabel 3: resultaten kalibratie α_{ij} en α_{ik} op testscenario.....	41
Tabel 4: resultaten kalibratie α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op testscenario	43
Tabel 5: resultaten kalibratie w_{ij} en w_{ik} op testscenario.....	44
Tabel 6: resultaten kalibratie w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op testscenario	46
Tabel 7: overzicht vraagoverschot en aanbodbeperking metingen.....	50
Tabel 8: resultaten kalibratie α_i op metingen.....	53
Tabel 9: resultaten kalibratie van α_i en t_{ik} op metingen.....	56
Tabel 10: resultaten kalibratie α_{ij} en α_{ik} op metingen.....	59
Tabel 11: resultaat kalibratie α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op metingen	61
Tabel 12: resultaten kalibratie w_{ij} en w_{ik} op metingen.....	64
Tabel 13: resultaten kalibratie w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op metingen	66
Tabel 14: theoretische α_i matrix met ratio's	87
Tabel 15: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} en α_{ik} op testscenario (1).....	87
Tabel 16: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} en α_{ik} op testscenario (2).....	87
Tabel 17: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} en α_{ik} op testscenario (3).....	88
Tabel 18: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op testscenario (1)	88
Tabel 19: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op testscenario (2)	88
Tabel 20: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op testscenario (3)	88
Tabel 21: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} en w_{ik} op testscenario (1).....	89
Tabel 22: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} en w_{ik} op testscenario (2).....	89
Tabel 23: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} en w_{ik} op testscenario (3).....	89
Tabel 24: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op testscenario (1)	89
Tabel 25: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op testscenario (2)	90
Tabel 26: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op testscenario (3)	90

Tabel 27: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} en α_{ik} op metingen (1).....	91
Tabel 28: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} en α_{ik} op metingen (2).....	91
Tabel 29: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} en α_{ik} op metingen (3).....	92
Tabel 30: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op metingen (1)	92
Tabel 31: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op metingen (2)	92
Tabel 32: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op metingen (3)	93
Tabel 33: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} en w_{ik} op metingen (1).....	93
Tabel 34: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} en w_{ik} op metingen (2).....	93
Tabel 35: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} en w_{ik} op metingen (3).....	94
Tabel 36: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op metingen (1)	94
Tabel 37: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op metingen (2)	94
Tabel 38: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op metingen (3)	95

Lijst van afkortingen en symbolen

α_i	parameter die de prioriteit aangeeft van voertuigen vanuit ingaande schakel i naar alle conflicten
α_{ij}	parameter die de prioriteit aangeeft van voertuigen vanuit ingaande schakel i voor het aanbod op uitgaande schakel j
α_{ik}	parameter die de prioriteit aangeeft van voertuigen vanuit ingaande schakel i voor het aanbod op het intern conflictpunt k
C_i	capaciteit op ingaande schakel i (vtg/u)
C_j	capaciteit op uitgaande schakel j (vtg/u)
f_{ij}	afslagfractie vanuit ingaande schakel i naar uitgaande schakel j
f_{ik}	afslagfractie vanuit ingaande schakel i naar conflictpunt k
i	ingaande schakel i
j	uitgaande schakel j
k	intern conflictpunt k
N_k	aanbod aan tijd op intern conflictpunt k
S_i	vraag op ingaande schakel i (vtg/u)
S_{ij}	vraag op ingaande schakel i voor uitgaande schakel j (vtg/u)
t_{ik}	tijd nodig voor een voertuig vanuit ingaande schakel i om conflictpunt k te overbruggen (bezettijd)
q_i	aantal voertuigen vanuit ingaande schakel i dat het kruispunt kan oversteken (vtg/u)
q_{ij}	aantal voertuigen vanuit ingaande schakel i dat het kruispunt kan oversteken naar uitgaande schakel j (vtg/u)
R_j	aanbod op uitgaande schakel j (vtg/u)
w_{ij}	wegingsfactor voor voorrangsparemeter α_{ij}
w_{ik}	wegingsfactor voor voorrangsparemeter α_{ik}

Hoofdstuk 1: Introductie

In deze masterproef wordt een dataverzameling georganiseerd om een knooppmodel te valideren. Na het uitvoeren van de metingen op een kruispunt in Delft en het uitvoeren van een theoretische analyse van een aantal verschillende kalibratiemethodes, kunnen deze methodes ook toegepast worden op de echte data. Na een analyse van de bekomen resultaten, kunnen inzichten en aanbevelingen met betrekking tot het knooppmodel, geformuleerd worden.

Deze masterproef start met een algemene literatuurstudie, waarin het onderwerp 'kruispuntmodellering' geplaatst wordt in het ruimere geheel van 'Dynamic Network Loading' en 'Dynamic Traffic Assignment'. Daarna wordt wat dieper ingezoomd op het knooppmodel zelf en worden ook de onderzoeksvraag en aanpak toegelicht.

Hoofdstuk 3 behandelt het knooppmodel waarmee in de masterproef gewerkt wordt. Na de bespreking van de opbouw van het model, wordt aangetoond dat de oplossing vaak een niet-uniek karakter heeft. Een praktische methode om toch tot een unieke oplossing te komen, wordt dan ook geformuleerd.

Hoofdstuk 4 geeft toelichting bij de gekozen gevalstudie. Na een verantwoording voor de keuze van het onderzochte kruispunt, wordt de omzetting naar de modelweergave besproken. Ten slotte volgt wat uitleg over het meetplan en de tellingen.

In Hoofdstuk 5 wordt de algemene aanpak van de kalibratie geïntroduceerd. Er zijn verschillende kalibratieprogramma's ontworpen en dit hoofdstuk geeft de algemene structuur weer. Het hoofdstuk start met een discussie van alle parameters die in aanmerking komen voor een kalibratie. Vervolgens komt de opbouw van het model aan bod. Na een bespreking van de algemene structuur, volgt wat toelichting over het gebruikte optimalisatiealgoritme. Het gebruik van dit optimalisatiealgoritme vraagt de definitie van een doelfunctie. Vandaar dat een aantal voorstellen voor een doelfunctie geformuleerd worden. Ten slotte worden een aantal criteria opgesteld waarmee de fit van de kalibratie kan beoordeeld worden. Na deze algemene opbouw van het model, worden de verschillende types kalibratiemodellen geïntroduceerd.

In Hoofdstuk 6 is een testscenario opgesteld waarmee de verschillende kalibratiemodellen zullen getest worden. Eerst wordt dit testscenario gehanteerd bij de keuze van de beste doelfunctie onder diegene die in Hoofdstuk 5 geformuleerd

zijn. De doelfunctie die hier als beste naar voor komt, zal ook gebruikt worden bij de kalibratie met behulp van de metingen. Na de keuze van de doelfunctie, wordt de toepassing van het testscenario op de verschillende kalibratiemodellen besproken.

Hoofdstuk 7 gebruikt de gemeten data voor het uitvoeren van de verschillende kalibratiemodellen. Eerst wordt wat toelichting gegeven bij de gebruikte data en de regimes die daarin aan bod komen. Vervolgens worden de waarden bepaald voor de parameters die vast verondersteld zijn bij het kalibreren. Na het uitvoeren van de kalibraties op het boven- en onderliggende model, kunnen besluiten getrokken worden.

Het doel van Hoofdstuk 8 is om enkele lessen te trekken voor kalibraties in de toekomst. Eerst wordt nagegaan in hoeverre het mogelijk is om een eenduidige set van parameters te verkrijgen bij het kalibreren van het kruispuntmodel. Een tweede deel bespreekt wat na het uitvoeren van dit onderzoek besloten kan worden over de validiteit van het model. Ten slotte wordt nagedacht over hoe een kalibratie en validatie succesvol zou kunnen uitgevoerd worden in de toekomst. In Hoofdstuk 9 wordt een finaal besluit geformuleerd.

Hoofdstuk 2: Algemene literatuurstudie, onderzoeksvraag en onderzoeksaanpak

In dit hoofdstuk wordt een algemene inleiding gegeven tot het onderwerp van deze masterproef, namelijk macroscopische kruispuntmodellering. Het eerste gedeelte geeft aan hoe dit onderwerp past in het grotere geheel van het 'Dynamic Traffic Assignment' (DTA) model. Deel twee zoomt iets verder in op het knooppuntmodel zelf. De functies die een knooppuntmodel kan vervullen, worden hier besproken. Daarna volgt een kort overzicht van de verschillende types knooppuntmodellen en het bestudeerde knooppuntmodel. Het derde deel behandelt de onderzoeksvragen en gehanteerde aanpak van deze masterproef.

2.1 Onderzoeksdomein: Macroscopische kruispuntmodellering

Dit eindwerk situeert zich in het onderzoeksdomein van de 'Macroscopische kruispuntmodellering'. Dit onderzoeksdomein kan gekaderd worden in het ruimere geheel van een 'Dynamic Network Loading' (DNL) model, wat op zijn beurt deel uitmaakt van het 'Dynamic Traffic Assignment' (DTA) model. Meer over het DNL en DTA model is te vinden in Cascetta (2001) [2].

2.1.1 Dynamic Traffic Assignment (DTA) model

Het doel van een DTA model is het bepalen van de staat van het verkeer op een netwerk, gegeven een bepaalde vraag. Binnen dit DTA model, kunnen twee delen beschouwd worden: het vraagmodel en het aanbodmodel.

Het vraagmodel/keuzemodel vertrekt van de HB (Herkomst-Bestemmings-) matrix die aangeeft hoeveel voertuigen vanuit een bepaalde oorsprong een bepaalde bestemming willen bereiken. Vaak wordt in DTA uitgegaan van een gebruikersevenwicht, waarbij het vertrektijdstip en de gevolgde route zo wordt gekozen dat de utiliteit van iedere gebruiker erdoor gemaximaliseerd wordt.

Het aanbodmodel, ook 'Dynamic Network Loading model' (DNL) genoemd, vertrekt van de gekozen tijdstippen en routes en propageert deze stromen over het netwerk. Dit netwerk bestaat uit wegen en kruispunten die in het model voorgesteld worden door schakels en knopen. Bij het propageren van de voertuigen over het netwerk, wordt dan ook rekening gehouden met de geometrie en de beschikbare capaciteit van het netwerk.

Een iteratieve wisselwerking tussen vraag- en aanbodmodel leidt idealiter tot een punt van convergentie, waarbij vraag en aanbod in evenwicht zijn met elkaar. In een gebruikersevenwicht is geen enkele gebruiker erbij gebaat om een andere route of een ander vertrektijdstip te kiezen.

2.1.2 Dynamic Network Loading (DNL) model

Dit onderdeel gaat iets dieper in op het DNL model dat deel uitmaakt van het DTA model. Er zijn verschillende types DNL modellen die corresponderen met verschillende types DTA modellen. Het onderzoek in deze masterproef spitst zich toe op het macroscopische DNL model. 'Macroscopisch' betekent dat er niet gefocust wordt op de individuele voertuigbewegingen, maar wel op de eigenschappen van de voertuigstromen. De propagatie van verkeer en congestie gebeurt op een macroscopisch niveau.

Zoals eerder vermeld, heeft het DNL model het doel om de verkeersstromen te propageren over het netwerk. Om dit te doen, is er opnieuw een wisselwerking tussen twee modellen, namelijk het schakelmodel en het knooppmodel. Beide modellen zijn aan elkaar gelinkt door het feit dat het schakelmodel berekent wat de vraag en het aanbod is op de in- en resp. uitgaande schakels van het knooppmodel. Met behulp van deze randvoorwaarden, kan het knooppmodel vervolgens bepalen welke stromen zich over het kruispunt kunnen propageren. Deze stromen vormen dan terug een voorwaarde voor het schakelmodel.

2.2 Het knooppmodel

Dit onderdeel zoomt wat verder in op het eigenlijke onderwerp van de masterproef, namelijk het knooppmodel. Eerst en vooral worden de verschillende functies die een knooppmodel kan vervullen, uiteengezet. Vervolgens worden twee manieren toegelicht waarop knooppmodellen kunnen opgedeeld worden. Ten slotte volgt wat meer uitleg over het knooppmodel waar het werk van Corthout (2012) over handelt [1].

2.2.1 Functies van het knooppmodel

Het knooppmodel kan drie functies vervullen. In de eerste functie, houdt het model rekening met de randvoorwaarden die gegeven worden door het schakelmodel. Deze randvoorwaarden worden ook de externe beperkingen genoemd. De stromen die

zich verplaatsen over het kruispunt, moeten consistent is met de aanwezige vraag op de ingaande schakels. De vraag staat voor het aantal voertuigen dat in een bepaalde tijdstap het kruispunt wenst over te steken in de richting van verschillende uitgaande schakels. De verdeling van voertuigen vanuit een ingaande schakel over de verschillende uitgaande schakels, is aangegeven door de afslagfracties. Daarnaast moet het model ook rekening houden met het aanbod op de uitgaande schakels. Het aanbod is gedefinieerd als het maximaal aantal voertuigen dat binnen een bepaalde tijdstap kan opgenomen worden door de uitgaande schakel. Wanneer er zich bijvoorbeeld fileterugslag vormt op een uitgaande schakel, zal het aanbod op deze schakel kleiner worden.

Een tweede functie die het knooppuntmodel kan vervullen, is het in rekening brengen van interne beperkingen. Immers, voertuigen die vanuit verschillende richtingen het kruispunt willen oversteken, kunnen dit gewoonlijk niet tegelijkertijd. Ook op het kruispunt zelf is een zeker 'aanbod' aan ruimte aanwezig dat tijdelijk kan ingenomen worden door voertuigen. Beperkingen op dit interne aanbod ontstaan door de aanwezigheid van: verkeerslichten, toeritdosering, kruisende conflicten, conflicten met fietsers en voetgangers en stromen die samenweven op een rond punt of in uitgaande schakel. Het laatste element in voorgaande opsomming, het samenweven van voertuigstromen in een uitgaande schakel, is een speciaal geval. Deze conflictsituatie kan zowel als een interne als een externe beperking gemodelleerd worden. In de praktijk wordt hier gewoonlijk een externe beperking voor gebruikt.

De derde en laatste functie die een knooppuntmodel kan vervullen is het toevoegen van een additionele vertraging die een compensatie vormt voor het niet expliciet modelleren van de stochasticiteit van wachtrijen. Meer hierover kan gevonden worden in de paper van Durlin & Henn, 2005 [3] en Yperman et al., 2007 [4].

2.2.2 Types knooppuntmodellen

Binnen de wereld van de macroscopische DNL knooppuntmodellen, kan op verschillende manieren een indeling gemaakt worden.

Vooreerst, kan een onderscheid gemaakt worden tussen puntmodellen en ruimtelijke modellen. Puntmodellen hebben geen expliciete weergave van de geometrische eigenschappen van het werkelijke kruispunt. De stromen over het kruispunt worden berekend door rekening te houden met een set van beperkingen. Bij erg complexe kruispunten, kan een ruimtelijk model gebruikt worden. Het kruispunt wordt dan gemodelleerd als een netwerk van meerdere schakels en 'dummy' knopen. De complexiteit van het kruispunt wordt zo gespreid over de verschillende netwerkelementen.

Een indeling kan ook gemaakt worden op basis van het type kruispunt dat gemodelleerd wordt. Een onderscheid kan gemaakt worden tussen kruispunten waar een voorrang van rechts geldt, kruispunten waar een stopstreep de voorrang bepaalt, rotondes, kruispunten waar een hoofdweg prioriteit heeft en lichtengeregelde kruispunten. Het gros van de DNL modellen werkt met een algemene definitie van

een kruispunt en kan toegepast worden op de meeste gevallen zonder lichtenregeling. Lichtengeregelde kruispunten hebben dus een apart model nodig en ook rotondes zijn hier een uitzondering op.

2.2.3 Bestudeerde knoopmodel

Vele knoopmodellen gaan uit van een of andere assumptie die niet realistisch is. Sommige modellen veronderstellen bijvoorbeeld dat voertuigen bij aankomst op een kruispunt, hun weg zullen vervolgen volgens het principe van de minste weerstand. Dit is echter geen realistisch gedrag. Andere modellen hebben geen realistische manier waarop het beschikbare aanbod verdeeld wordt over de concurrerende ingaande schakels. Sommige modellen houden ook geen rekening met het beperkte aanbod aan plaats om over te steken op het kruispunt. Het is duidelijk dat richtlijnen voor een realistisch ontwerp van kruispuntmodellen, waardevol zijn.

Corthout (2012) formuleert een set van zeven generische voorwaarden voor eerste orde macroscopische DNL kruispuntmodellen. Deze voorwaarden (uitvoeriger besproken in 3.1.1) vormen een leidraad bij het ontwikkelen van kruispuntmodellen en helpen om tot een realistische en consistente oplossing te komen. Het macroscopische knoopmodel dat geïntroduceerd wordt in het werk van Corthout (2012), voldoet aan deze zeven voorwaarden. Ook vervult dit model twee van de drie eerder vermelde functies. Er wordt immers rekening gehouden met externe beperkingen die opgelegd worden vanuit de in- en uitgaande links. Daarbovenop is ook de beperkte ruimte op het kruispunt ingecalculeerd. Feit is dat, onder bepaalde randvoorwaarden, het toevoegen van deze interne beperkingen aan het model kan leiden tot het bestaan van meerdere oplossingen. Het vermijden van het bestaan van meerdere oplossingen in combinatie met het voldoen aan de zeven voorwaarden, legt grote beperkingen op aan de invulling van het model. In Corthout (2012) is een methode geformuleerd waarmee toch een unieke oplossing bereikt wordt. Het model en de voorgestelde methode, worden uitvoerig besproken in Hoofdstuk 3. Het doel van deze masterproef is om deze methode te analyseren en te valideren. Een verdere uitwerking en beschrijving van de onderzoeksvraag en aanpak, is geformuleerd in het volgende onderdeel.

2.3 Onderzoeksvraag en aanpak

2.3.1 Doelstellingen

Het doel van deze masterproef is om de aannames en outputs van het knoopmodel zoals het geformuleerd is door Corthout (2012), te valideren. Hiervoor dient een kalibratiemodel opgesteld te worden. Dit model wordt geëvalueerd en verfijnd met behulp van een testcase. Uit de analyse van de testcase kunnen al een aantal inzichten geformuleerd worden. Na deze theoretische analyse, worden ook realistische data gebruikt voor de kalibratie. Om die realistische data te verkrijgen, wordt een dataverzameling georganiseerd. Na een analyse van de kalibratie en validatie op basis van de realistische data, kunnen uitspraken gedaan worden over de validiteit van het knoopmodel. De praktische bruikbaarheid van het model, eventuele tekortkomingen of beperkingen van het model en aanbevelingen naar kalibraties in de praktijk toe worden ten slotte ook geformuleerd.

2.3.2 Aanpak

Eerst en vooral is een goed begrip nodig van het doctoraatswerk van Corthout (2012) en het bijhorende knoopmodel in Matlab (Hoofdstuk 2 en 3). Vervolgens kunnen een aantal kalibratiemodellen opgezet worden waarbij verschillende sets van parameters gekalibreerd worden. Hierbij is het belangrijk om een geschikte doelfunctie te identificeren, op basis waarvan het optimalisatie algoritme de kalibratie kan uitvoeren (Hoofdstuk 5 en 6). De verschillende kalibratiemodellen worden getest met behulp van een testscenario. Op die manier kunnen reeds een aantal inzichten wat betreft de werking van de kalibratie, verworven worden (Hoofdstuk 6).

Parallel aan het opzetten van de kalibratiemodellen, gebeurt de identificatie van een geschikt kruispunt waarop de metingen zullen plaatsvinden (Hoofdstuk 4). Na het opstellen van een meetplan en het uitvoeren van de metingen, kan de dataverwerking van start gaan.

De verkregen data vormen een invoer voor de kalibratiemodellen die reeds getest zijn met behulp van het testscenario (Hoofdstuk 7). Na een analyse van de resultaten kan het meest geschikte kalibratiemodel geïdentificeerd worden.

Om de masterproef te besluiten, worden de verworven inzichten nog even op een rijtje gezet. Eventuele vuistregels, voorwaarden of tekortkomingen van het kalibratiemodel worden geformuleerd. Ook wat betreft het knoopmodel worden de inzichten inzake validiteit en richtlijnen voor toekomstige validaties toegelicht (Hoofdstuk 8).

Hoofdstuk 3: Specifieke literatuurstudie over bestudeerde knoopmodel

In dit hoofdstuk wordt het kruispuntmodel uit het werk van Corthout (2012) kort voorgesteld. Corthout (2012) introduceert een kruispuntmodel dat naast de externe beperkingen ook de interne beperkingen in rekening brengt. Hierover wordt verder uitgeweid in het eerste onderdeel van dit hoofdstuk. Het tweede onderdeel handelt over het niet-unieke karakter van de oplossingen uit dit kruispuntmodel. Het derde onderdeel reikt een praktische methode aan die leidt tot een eenduidige oplossing. Tot slot wordt in het vierde deel een besluit geformuleerd.

3.1 Opbouw van het model: externe en interne beperkingen

Zoals eerder vermeld, is het rekening houden met externe beperkingen een primaire functie van een knoopmodel. Vandaar dat deze ook eerst besproken worden. Daarop volgt dan de toevoeging van de interne beperkingen. Deze zorgt ervoor dat de resulterende stromen over het kruispunt ietwat realistischer worden, door rekening te houden met de beperkte beschikbare ruimte op het kruispunt zelf. In sectie 3.1.3 wordt ten slotte de invulling van de α_{ij} en α_{ik} parameters besproken.

3.1.1 Externe beperkingen

Om consistentie te verzekeren met de principes van de eerste orde verkeersstroomtheorie, moet elk macroscopisch knoopmodel aan een aantal voorwaarden voldoen:

- Toepasbaarheid voor gelijk welk aantal ingaande en uitgaande schakels
- De resulterende stromen moeten positief zijn
- Behoud van voertuigen
- Consistentie met beperkingen van vraag en (intern) aanbod
- Maximalisering van de verkeersstromen
- Behoud van afslagfracties
- Nakoming van het invariantieprincipe van Lebacque & Khoshyaran (2005)

De laatste drie voorwaarden vragen iets meer uitleg. Met de ‘maximalisering van de verkeersstromen’ wordt bedoeld dat binnen een bepaalde tijdstap zoveel mogelijk voertuigen het kruispunt moeten kunnen oversteken. Dit is ook een noodzakelijke voorwaarde om een realistisch model te verkrijgen. Het ‘behoud van afslagfracties’ wijst op het FIFO (First-In-First-Out) principe. De voertuigstromen die vanuit een ingaande schakel vertrekken naar verschillende uitgaande schakels, moeten zich in overeenstemming met de afslagfracties verhouden ten opzichte van de totale stroom vanuit die ingaande schakel. Het ‘invariantieprincipe’ eist dat, wanneer de uitstroom uit een ingaande schakel kleiner is dan de vraag op die schakel, de vraag mag vervangen worden door de afrijcapaciteit van deze schakel. Op een analoge wijze moet het model invariant zijn voor een vervanging van het aanbod van een uitgaande schakel door de capaciteit wanneer de uitstroom in de uitgaande schakel kleiner is dan het aanbod.

Hieraan moeten nog de ‘Supply Constraint Interaction Rules’ (SCIR) toegevoegd worden. De resulterende set van vergelijkingen zorgt ervoor dat de combinatie van vraag- en aanbodbeperkingen gerespecteerd wordt in de oplossing. Het kruispuntmodel dat enkel rekening houdt met de externe beperkingen, ziet er dan als volgt uit:

$$q_i \leq S_i \quad \forall i \quad (1)$$

$$f_{ij} = \frac{S_{ij}}{S_i} = \frac{q_{ij}}{q_i} \quad (2)$$

$$\hat{R}_j(q) = \sum_i f_{ij} q_i - R_j \leq 0 \quad \forall j \quad (3)$$

$$U_j = \{i | i \rightarrow \hat{R}_j\} \quad \forall j \quad (4)$$

$$q_i < S_i \Leftrightarrow \exists j | i \in U_j \quad \forall i \quad (5)$$

$$U_j = \emptyset \Leftrightarrow \hat{R}_j < 0 \quad \forall j \quad (6)$$

$$U_j \neq \emptyset \Leftrightarrow \hat{R}_j = 0 \quad \forall j \quad (7)$$

$$\frac{q_i}{q_{i'}} \geq \frac{\alpha_{ij}}{\alpha_{i'j}} \quad \forall i \in U_j \text{ \& } f_{i'j} > 0 \quad (8)$$

Een aantal nieuwe symbolen wordt hier gedefinieerd. Het symbool S_i staat voor de vraag van ingaande schakel i . Dat is het aantal voertuigen dat in deze tijdstap vanuit ingaande schakel i het kruispunt wenst over te steken naar verschillende uitgaande schakels j . Het symbool S_{ij} staat dan voor de vraag vanuit ingaande schakel i naar uitgaande schakel j . q_i staat voor de stroom die in deze tijdstap vanuit ingaande schakel i ook effectief het kruispunt kan overbruggen. q_{ij} staat voor het deel van q_i dat zijn weg verderzet in uitgaande schakel j . De afslagfracties f_{ij} geven aan hoe de vraag S_i en uitstroom q_i verdeeld zijn over de verschillende uitgaande schakels. Het symbool R_j staat voor het aanbod dat voor een bepaalde tijdstap aanwezig is op uitgaande schakel j .

Vergelijking 1 garandeert dat de berekende stroom q_i uit een ingaande schakel i nooit hoger zal zijn dan de vraag S_i op die ingaande schakel. Deze vergelijking wordt ook de vraagbeperking genoemd en geldt voor elke ingaande schakel. Vergelijking 2 staat voor het behoud van de afslagfracties f_{ij} bij de berekening van de uitstroom uit schakel i naar schakel j . Vergelijking 3 zorgt ervoor dat het totaal aan voertuigen dat in uitgaande schakel j terecht komt niet groter is dan het aanbod R_j van deze schakel.

Vergelijkingen 4 tot 8 stellen de ‘supply constraint interaction rules’ (SCIR) voor. Vergelijking 4 stelt dat er een U_j is voor iedere uitgaande schakel j . U_j is een verzameling van ingaande schakels i waarvoor geldt dat ze beperkt worden door de aanbodbeperking van uitgaande schakel j . Volgens vergelijking 5, kan de stroom vanuit een ingaande schakel enkel kleiner zijn dan de vraag, wanneer deze beperkt wordt door het aanbod op een uitgaande schakel. Vergelijkingen 6 en 7 drukken uit dat een beperking enkel een invloed kan hebben op de verkeersstroom, wanneer deze volledig is opgebruikt. In de laatste vergelijking (8), worden de prioriteringsparameters α_{ij} geïntroduceerd. Wanneer er competitie is voor het aanbod op een uitgaande schakel, bepalen de α_{ij} waarden hoe groot het deel zal zijn dat ingaande link i krijgt van aanbod j . Vergelijking 8 zegt dat een ingaande stroom q_i minstens het deel van het aanbod zal opnemen, waar hij recht op heeft. Er staat een ongelijkheidsteken omwille van het feit dat er een ingaande schakel i' zou kunnen zijn die zijn deel van het aanbod niet volledig kan opnemen omwille van een andere, meer restrictieve beperking. Dan zal het deel van R_j voor ingaande schakel i ($\in U_j$) vergroten.

De set van vergelijkingen 1 tot 8 is voldoende om de verkeersstromen te vinden vanuit elke ingaande schakel die in overeenstemming zijn met de externe aanbodbeperkingen. Onderstaande formules geven echter nog wat bijkomende inzichten.

$$\frac{q_i}{q_{i'}} = \frac{\alpha_{ij}}{\alpha_{i'j}} \quad \forall i, i' \in U_j \quad (9)$$

$$q_i = \min_{j|U_j \neq \emptyset \& f_{ij} > 0} (S_i, \frac{\alpha_i}{\sum_{i' \in U_j} f_{i'j} \alpha_{i'}} (R_j - \sum_{i \notin U_j} f_{ij} q_i)) \quad \forall i \quad (10)$$

Formule 9 is geldig wanneer twee ingaande schakels beperkt worden door dezelfde R_j beperking. In dat geval, zal de verhouding van de α_{ij} waarden de stromen bepalen. Vergelijking 10 maakt duidelijk dat de uitstroom uit een ingaande schakel gelijk is aan het minimum van twee componenten, zijnde de vraag en de meest strenge aanbodbeperking.

3.1.2 Interne beperkingen

Dit onderdeel heeft het doel om ook de interne beperkingen op te nemen in het knooppmodel. Deze zijn immers niet te verwaarlozen, aangezien ze de oorzaak zijn van vele verkeersproblemen in regionale en stedelijke netwerken. Ondanks het belang van de interne beperkingen, is er zelden rekening mee gehouden in state-of-

the-art modellen. In het werk van Corthout (2012) gebeurt dit wel. Volgende vergelijkingen zijn dan ook afkomstig uit dit werk:

$$\widehat{N}_k(q) \leq 0 \quad \forall k \quad (11)$$

$$U_k = \{i | i \rightarrow \widehat{N}_k\} \quad \forall k \quad (12)$$

$$U_k = \emptyset \Leftrightarrow \widehat{N}_k < 0 \quad \forall k \quad (13)$$

$$U_k \neq \emptyset \Leftrightarrow \widehat{N}_k = 0 \quad \forall k \quad (14)$$

$$\frac{q_i}{q_{i'}} \geq \frac{\alpha_{ik}}{\alpha_{i'k}} \quad \forall i, i' | i \in U_k \text{ \& } f_{i',k} > 0 \quad (15)$$

$$\frac{q_i}{q_{i'}} = \frac{\alpha_{ik}}{\alpha_{i'k}} \quad \forall i, i' \in U_k \quad (16)$$

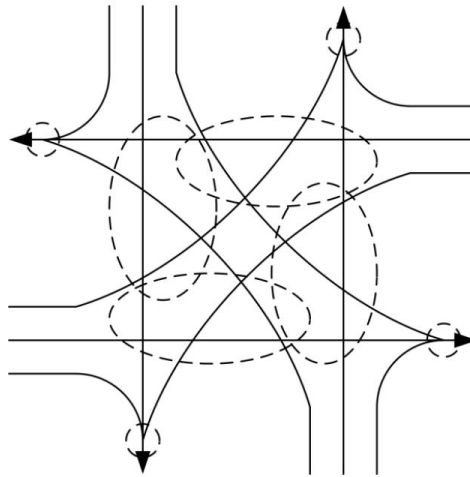
$$q_i < S_i \Leftrightarrow \exists j | i \in U_j \text{ of } \exists k | i \in U_k \quad \forall i \quad (17)$$

Hierbij staat $\widehat{N}_k(q)$ voor de interne aanbodbeperking van conflictpunt k. De parameter f_{ik} geeft aan welke fractie van de voertuigen vanuit ingaande schakel i over het conflictpunt k rijdt om de uitgaande schakel te bereiken. De betekenis van vergelijking 11 tot 16 is dezelfde als deze van de vergelijkingen uit de vorige sectie, maar dan toegepast op de interne beperkingen. Vergelijking 17 vormt een vervanging van vergelijking 5, aangezien de stroom op een ingaande link i nu beperkt kan worden door zowel een interne als een externe beperking.

De vergelijking voor de interne aanbodbeperking (18) dient wat verder uitgelegd te worden. Interne conflictpunten kunnen namelijk benaderd worden door gebruik te maken van 'gap acceptance theory' of 'conflict theorie'. Corthout (2012) kiest voor het gebruik van de conflict theorie omdat deze meer gepast is bij situaties met een hoge saturatiegraad. Bij conflict theorie worden een aantal zones op het kruispunt geïdentificeerd. Deze zones zijn ruimtes die door meerdere, kruisende voertuigstromen gebruikt worden. Figuur 1 toont een voorbeeld van de bepaling van conflictzones, afkomstig uit Brilon & Wu (2001) [5]. Meer informatie over conflict theorie, kan gevonden worden in Wu (2000) [6], Brilon & Miltner (2005) [7] en Brilon & Wu (2001) [5]. Eén zone beschikt over 3600 seconden per uur, dat is het aanbod N_k . Dit aanbod kan opgebruikt worden door voertuigen, komende vanuit verschillende ingaande schakels. De tijd die een voertuig vanuit ingaande schakel i nodig heeft om een conflictpunt k over te steken, zit vervat in de parameter t_{ik} . In praktijk, kan deze parameter gekalibreerd worden. Indien hier echter niet voldoende data of tijd voor beschikbaar is, kan formule 19 een plausibele assumptie bieden. $C^{L,ik}$ staat voor de capaciteit van de afslagstro(o)k(en) van ingaande schakel i van waaruit de beweging ik vertrekt.

$$\widehat{N}_k(q) = \sum_i f_{ik} q_i t_{ik} - N_k \leq 0 \quad \forall k \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{Met: } N_k &= 3600 \text{ s/u} \\ t_{ik} &= \frac{3600}{C^{L,ik}} \end{aligned} \quad (19)$$



Figuur 1: aanduiding van conflictzones op een 4x4 kruispunt (Brilon & Wu, 2001) [5]

Bij het gebruik van de conflictzones, dienen nog drie opmerkingen gemaakt te worden. Ten eerste wordt verondersteld dat wachtende voertuigen de conflictzones niet zullen bezetten. In realiteit zou dit wel het geval kunnen zijn. Ten tweede, zal conflict theorie elke conflictzone apart behandelen. Dat betekent dat het rijgedrag waarbij meerdere conflictzones tegelijk worden geïnterpreteerd door de bestuurder, niet zo wordt gemodelleerd. Dit kan leiden tot een overschatting van de stromen vanuit de richting die voorrang moet verlenen. Een derde opmerking is dat het model de stromen beperkt die beïnvloed worden door de strengste beperking. In realiteit is het echter denkbaar dat een stroom bij het oversteken beperkt wordt door twee kruisende conflicten en niet door de strengste van beide. Hierdoor wordt in het model toch wel een deel van de interactie tussen conflictzones verwaarloosd.

3.1.3 Invulling van de α_{ij} en α_{ik} parameters

In wat volgt, wordt ook de invulling van de α_{ij} en de α_{ik} parameters nog verder toegelicht. Zoals eerder vermeld, geven deze parameters aan hoe groot de prioriteit is voor voertuigen vanuit een ingaande schakel i naar een uitgaande schakel j of respectievelijk een intern conflictpunt k . De invulling van deze parameters hangt af van de geldende voorrangsregels. Daarnaast kan het rijgedrag van de bestuurders ook een belangrijke rol spelen. Wanneer een kruispunt gekenmerkt is door een hoge saturatiegraad, is het mogelijk dat voertuigen vanuit de geprioriteerde stroom toch voorrang verlenen aan niet-geprioriteerden. Vanuit dit oogpunt, kan een indeling gemaakt worden van de voorrangsparements naargelang het rijgedrag van de bestuurders:

- Absolute naleving van de verkeersregels

In dit geval bestaat er een bepaalde volgorde die stelt welke ingaande schakels voorrang krijgen. Die rangorde kan bijvoorbeeld uitgedrukt worden met behulp van de indices $m=1 \dots M$. Ingaande schakel i_m heeft dan absolute voorrang op schakels i_{m+1} tot i_M maar moet absoluut voorrang verlenen aan schakels i_1 tot i_{m-1} . Vergelijkingen 20 tot 23 geven aan hoe de interne prioriteringsparameters er dan uitzien. Voor externe conflicten kunnen dezelfde formules gebruikt worden.

$$\alpha_{i_1k} = 1 - \sum_{m=2 \dots M} \varepsilon^{m-1} \quad (20)$$

$$\alpha_{i_2k} = \varepsilon \quad (21)$$

$$\alpha_{i_3k} = \varepsilon^2 \quad (22)$$

$$\dots$$

$$\alpha_{i_Mk} = \varepsilon^{M-1} \quad (23)$$

- Ritsgedrag

Het aanbod op het kruispunt of op de uitgaande schakels wordt in dit geval verdeeld volgens een beurtrol. De verdeling van het aanbod over de inkomende schakels is afhankelijk van de capaciteiten van de ingaande schakels.

$$\alpha_{ij} = \frac{C_i}{\sum_{i' | f_{i'j} > 0} C_{i'}} \quad (24)$$

$$\alpha_{ik} = \frac{C_i}{\sum_{i' | f_{i'k} > 0} C_{i'}} \quad (25)$$

De α_{ij} en α_{ik} parameters kunnen ook gekozen worden tussen de twee voorgaande extremen in.

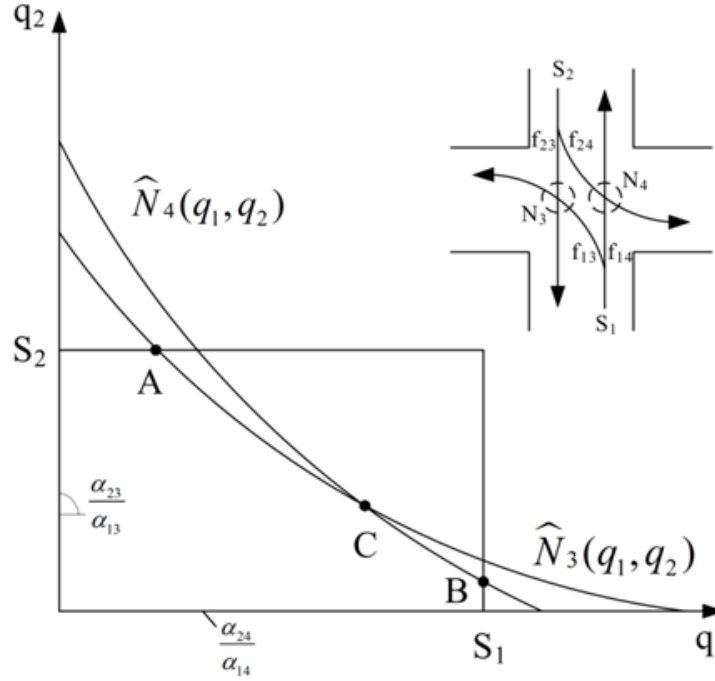
3.2 Niet-unieke aard van de oplossing

Wanneer gebruik gemaakt wordt van een model dat externe en interne beperkingen in rekening brengt, blijkt dat de aanwezigheid van meerdere oplossingen onder realistische randvoorwaarden, mogelijk is. In wat volgt, wordt dit verduidelijkt aan de hand van een voorbeeld.

Figuur 2 geeft een situatie weer waarin er twee ingaande schakels zijn met vraag S_1 en S_2 . Voor beide stromen zijn afslagfracties gedefinieerd voor de richtingen rechtdoor en linksaf. Er zijn twee kruisende conflictpunten aanwezig, namelijk N_3 en N_4 . De voertuigen die rechtdoor gaan, krijgen absolute prioriteit, wat betekent dat de parameters α_{23} en α_{14} een waarde krijgen van 1 terwijl α_{24} en α_{13} gelijk gesteld worden aan 0. Wanneer de beperkingen en SCIR uit 3.1 in rekening gebracht worden, kunnen drie verschillende oplossingen gedefinieerd worden (A, B en C). In oplossing A resp. B, kunnen ingaande schakels 2 resp. 1 absolute voorrang nemen. Het resterende aanbod kan dan opgenomen door schakels 1 resp. 2. Oplossing C geeft de situatie weer waarbij stroom q_1 en q_2 beperkt worden door N_3 respectievelijk N_4 .

Dit voorbeeld geeft aan dat reeds onder simpele condities, meerdere oplossingen kunnen voortkomen uit dit model. Voor de huidige DNL modellen is het echter onmogelijk om hiermee te werken. Beter dan willekeurig een oplossing te kiezen uit

de oplossingsruimte, zou het zijn om met een logische methode tot een unieke oplossing te komen. Het volgende onderdeel stelt zo een methode voor.



Figuur 2: illustratie van meerdere oplossingen voor het knooppuntmodel [1]

3.3 Praktische methode om tot een unieke oplossing te komen

In dit onderdeel wordt een methode voorgesteld waarmee een unieke oplossing kan worden bereikt met het knooppuntmodel, voorgesteld in onderdeel 3.1. In Corthout (2012) wordt bewezen dat een unieke oplossing wel wordt bereikt wanneer elke inkomende link dezelfde prioriteit heeft voor alle interne en externe conflicten. Dat betekent dat er voor elke ingaande schakel één enkele α_i waarde gebruikt wordt. Om deze α_i waarde te verkrijgen voor elke ingaande schakel, wordt volgende formule voorgesteld:

$$\alpha_i = \sum_j w_{ij} \alpha_{ij} + \sum_k w_{ik} \alpha_{ik} \quad \forall i \quad (26)$$

$$\text{Met } \alpha_{ij} > 0 \text{ \& } \alpha_{ik} > 0 \quad \forall i, j, k \quad (27)$$

$$\sum_i \alpha_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (28)$$

$$\sum_i \alpha_{ik} = 1 \quad \forall k \quad (29)$$

$$w_{ij} \geq 0 \text{ \& } w_{ik} \geq 0 \quad \forall i, j, k \quad (30)$$

$$\sum_j w_{ij} + \sum_k w_{ik} = 1 \quad (31)$$

De α_{ij} en α_{ik} parameters worden bepaald volgens de voorrangsregels die gelden op het extern of intern conflictpunt (zie sectie 3.1.3). Vervolgens zorgen de w_{ij} en w_{ik} parameters ervoor dat deze α_{ij} en α_{ik} gewogen worden naargelang de verwachte invloed op de uiteindelijke stroom over het kruispunt. De gewichten die hiervoor gebruikt worden, kunnen als volgt gedefinieerd worden:

$$w_{ij}^{start} = \frac{f_{ij}C_i}{C_j} \sum_{i'} \frac{f_{i'j}C_{i'}}{C_j} \quad \forall i, j \quad (32)$$

$$w_{ik}^{start} = \frac{f_{ik}C_i t_{ik}}{N_k} \sum_{i'} \frac{f_{i'k}C_{i'} t_{i'k}}{N_k} \quad \forall i, k \quad (33)$$

$$w_{ij} = \frac{w_{ij}^{start}}{\sum_j w_{ij}^{start} + \sum_k w_{ik}^{start}} \quad \forall i, j \quad (34)$$

$$w_{ik} = \frac{w_{ik}^{start}}{\sum_j w_{ij}^{start} + \sum_k w_{ik}^{start}} \quad \forall i, k \quad (35)$$

De gewichten zijn dus gebaseerd op een aantal input parameters van het knooppunt. De vraag S en het aanbod R worden niet gebruikt in deze formules omwille van het invariantieprincipe van Lebacque & Khoshyaran (2005). De afslagfracties (f_{ij} , f_{ik}), capaciteiten van inkomende (C_i) en uitgaande schakels (C_j) en de interne conflictpunten (N_k) en de tijd nodig om deze over te steken (t_{ik}), worden wel gebruikt. In vergelijking 34 en 35 worden de gewichten genormaliseerd.

3.4 Besluit

In dit hoofdstuk is het knooppunt voorgesteld waarmee in deze masterproef verder zal gewerkt worden. Dit knooppunt houdt rekening met de externe aanbodbeperkingen. Daarnaast wordt ook de beperkte ruimte op het kruispunt in rekening gebracht door de interne beperkingen. Deze formulering van het model leidt bij heel wat condities tot het bestaan van meerdere oplossingen. Om het bestaan van deze meerdere oplossingen te vermijden, is een praktische methode geformuleerd waarmee een unieke oplossing bereikt wordt.

Hoofdstuk 4: Gevalstudie

De doelen van deze masterproef bestaan uit het analyseren, kalibreren en evalueren van het kruispuntmodel met behulp van realistische data. Voor het verkrijgen van de data is het opzetten van een dataverzameling nodig. Dit hoofdstuk is dan ook gewijd aan de bespreking van de keuze van het bestudeerde kruispunt en de manier waarop dit kruispunt in het model is weergegeven. Ten slotte worden ook het meetplan en de manier waarop de tellingen verwerkt zijn, toegelicht.

4.1 Keuze van het bestudeerde kruispunt

Deze sectie licht de keuze van het kruispunt voor de gevalstudie toe. Eerst wordt aangegeven over welk kruispunt het gaat en waar het precies gelegen is. Daarna volgt een verklaring voor de keuze van dit specifieke kruispunt.

Het kruispunt waar deze masterproef zich op baseert, is gelegen in Delft. Het gaat om de kruising van de Schoemakerstraat en een af- en oprit van de Kruithuisweg. Figuur 3 toont een satellietbeeld van het kruispunt.



Figuur 3: satellietbeeld van kruispunt

De keuze om dit kruispunt te modelleren is niet arbitrair. Vooreerst werd om praktische redenen een kruispunt uitgezocht dat in de buurt ligt van de Technische

Universiteit Delft. De metingen zijn immers uitgevoerd met hulp en materiaal van de TUD.

Een tweede reden voor de keuze van dit kruispunt, heeft te maken met het beoogde doel van de meetresultaten. Logischerwijze kunnen bij een kalibratie enkel de waargenomen fenomenen gekalibreerd worden. Als er, met andere woorden, geen activatie optreedt van interne of externe beperkingen, dan zal de manier waarop voorrang genomen wordt ook niet gekalibreerd kunnen worden. Feit is, dat het bovenvermelde kruispunt gekend staat om de grote drukte op de spitsuren. Gedurende de avondspits is een grote verkeersstroom, komende vanuit Noordelijke richting van de Schoemakerstraat, kenmerkend. Dit fenomeen veroorzaakt de activatie van een interne beperking. Daarenboven is er ook vaak fileterugslag op de oprit naar de Kruithuisweg. Dit betekent dat de aanbodbeperking van die schakel op die momenten geactiveerd wordt. De combinatie van deze interne en externe beperking, vormt een interessante case voor een eerste kalibratie op het besproken knooppuntmodel. In een verder stadium, kunnen complexere kruispunten aangepakt worden.

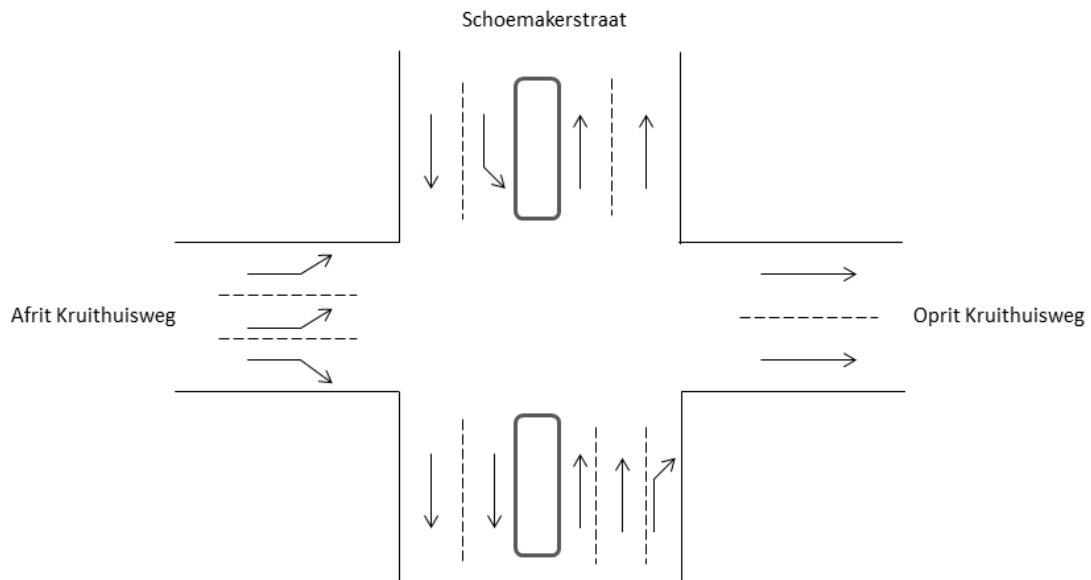
4.2 Modelweergave van het kruispunt

In dit onderdeel wordt de overgang besproken van het reële kruispunt naar de modelweergave. De variabelen die hierbij geïntroduceerd worden, zijn de vraag op de ingaande schakels (S_i), het aanbod op de uitgaande schakels (R_i) en de afslagfracties f_{ij} . Ten slotte worden ook de conflictpunten geïdentificeerd en genummerd. Het is belangrijk om op te merken dat verschillende modelweergaves mogelijk zijn.

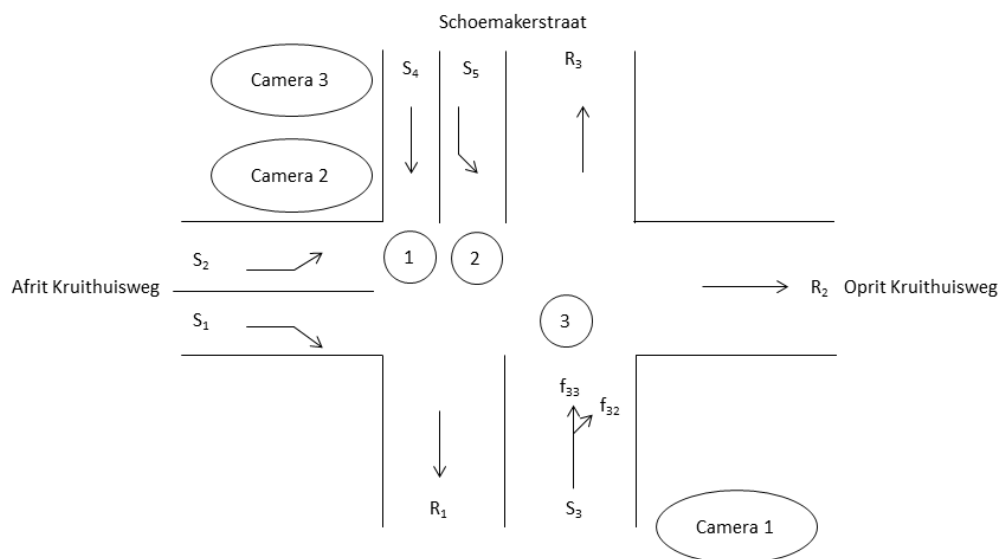
Figuur 4 geeft weer hoe het kruispunt er in realiteit uitziet. Het model dat gebruikt wordt bij de berekeningen is zichtbaar in Figuur 5. De algemene regel is dat rijstroken die het verkeer naar dezelfde richting sturen, samengevoegd worden tot één ingaande schakel. Wanneer de aanwezigheid van wachtrijen mogelijk is, moeten rijstroken die verschillende richtingen aangeven, afzonderlijk gemodelleerd worden omwille van het FIFO principe. Ingaande schakel 3 (Figuur 5) bestaat in werkelijkheid uit drie rijstroken met een verschillende bestemming. De reden voor het samennemen van deze drie rijstroken is het feit dat hier geen vorming van wachtrijen verwacht wordt. Het gevolg van het samennemen van de rijstroken van schakel 3, is het ontstaan van afslagfracties die verschillend zijn van 1.

In totaal zijn er vijf ingaande schakels met vraag S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 en drie uitgaande schakels met aanbod R_1, R_2, R_3 gedefinieerd. Afslagfractie f_{32} geeft aan hoeveel voertuigen vanuit ingaande schakel 3 naar uitgaande schakel 2 gaan. Analooft geeft afslagfractie f_{33} aan hoeveel voertuigen vanuit ingaande schakel 3, uitgaande schakel 3 nemen. Dan rest nu nog de identificatie van de conflictpunten. Voor de stromen vanuit iedere ingaande schakel wordt bepaald waar de conflicten liggen met stromen vanuit andere ingaande schakels. Deze conflicten kunnen op het kruispunt zelf liggen

(interne conflicten) of aan de ingang van een uitgaande schakel (externe conflicten). In dit concreet geval, kunnen drie interne conflictpunten geïdentificeerd worden. Conflictpunt 1 geeft de kruising aan van stromen komende vanuit ingaande schakel 2 en 4, conflictpunt 2 doet dat voor de stromen vanuit schakel 2 en 5 en conflictpunt 3 doet dit voor de stromen vanuit schakel 3 (de fractie die rechtdoor gaat) en 5. Met de externe conflicten wordt rekening gehouden door de vergelijkingen die de beperking van het aanbod weergeven. Hiervoor moeten dus geen zones gedefinieerd worden.



Figuur 4: werkelijke configuratie kruispunt



Figuur 5: modelconfiguratie

4.3 Meetplan en tellingen

Op 4 maart werd de avondspits op het kruispunt van de Schoemakerstraat en de Kruithuisweg gefilmd met behulp van drie camera's op verschillende hoogtes en locaties. Zoals eerder vermeld, gebeurde dit met camera-apparatuur van de TU Delft. Het meetplan is weergegeven in Figuur 5. Camera 1 is gepositioneerd op een hoogte van ongeveer 13 meter en geeft een goed zicht op wat op het kruispunt zelf gebeurt. Ook het begin van eventuele wachtrijen kan gedetecteerd worden op deze camerabeelden. Camera 2 geeft een goede uitkijk op uitgaande schakel 2, dat is de schakel waar fileterugslag op verwacht wordt. Ten slotte is er nog camera 3 die niet gericht is naar het kruispunt toe maar naar de volledige ingaande schakels 4 en 5 om de wachtrijen daar beter in beeld te brengen.

Bij opnames vanop voldoende hoogte, kunnen eventueel trajectoriën van de voertuigen verkregen worden. Dat zou dus ook mogelijk zijn met de camerabeelden van camerapositie 1. Met behulp van deze trajectoriën kan het gedrag van voertuigen op een microscopisch niveau geanalyseerd worden. In deze masterproef is echter geen gebruik gemaakt van deze mogelijkheid. Dit komt omdat deze masterproef zich focust op het macroscopische niveau. De voertuigstromen worden manueel geteld met behulp van het beeldmateriaal. In een volgend stadium zou het wel interessant zijn om bijvoorbeeld het voorrangsgedrag op microniveau te analyseren. Hierbij kan het gebruik van de trajectoriën een grote hulp zijn.

De gegevens die uit observatie van de camerabeelden gehaald worden, zijn de vraag op de inkomende schakels, het aanbod op de uitgaande schakels, de afslagfracties en de uitstroom over het kruispunt. Het is de bedoeling dat deze gegevens beschikbaar zijn per tijdstap. Het is wenselijk om op basis van het beeldmateriaal waardes te kunnen bepalen voor de capaciteiten van in- en uitgaande schakels. Omwille van praktische redenen was dit echter onmogelijk. Het meten van afrijcapaciteiten vraagt immers de aanwezigheid van een voldoende grote wachtrij en deze is zeker niet op alle ingaande schakels aanwezig. Hoe dan wel wordt omgegaan met variabelen C_i en C_j , wordt verder toegelicht in sectie 5.1.

De camerabeelden worden verwerkt door per halve minuut en per ingaande schakel te gaan tellen hoeveel voertuigen kunnen invoegen op de gewenste uitgaande schakel. Hiermee is dus de stroom q_i over het kruispunt gekend per tijdstap van een halve minuut. Afslagfracties f_{ij} en f_{ik} kunnen hier ook uit afgeleid worden. De vraag per ingaande schakel per tijdstap (S_i) wordt ook gelijk gesteld aan deze uitstroom, tenzij er structurele file staat op een schakel. Dan wordt de vraag gelijk gesteld aan de capaciteit C_i van deze schakel. Het aanbod op de uitgaande schakels (R_j) wordt gelijk gesteld aan de capaciteit C_j , tenzij er fileterugslag optreedt. Dan wordt het aanbod gelijkgesteld aan de instroom in de uitgaande schakels.

In deze laatste paragraaf, wordt nog even besproken wat de bevindingen zijn over het verloop van metingen. Op de ingaande schakels zijn structurele files enkel te vinden op ingaande schakel 5 (met een duur van ongeveer 40 minuten,

aaneengesloten). Daardoor ontstaat een strijd om het aanbod van intern conflictpunt 3 tussen de voertuigen vanuit ingaande schakel 5 en de voertuigen vanuit ingaande schakel 3 die rechtdoor wensen te gaan. Gedurende de aanwezigheid van de structurele file op ingaande schakel 5, is er ook een op- en afbouw van een fileterugslag op de oprit naar de Kruithuisweg. Dat betekent dat de externe beperking van het aanbod op uitgaande schakel 2 op dat moment geactiveerd wordt en interne beperking 3 tijdelijk niet meer actief is. De duur van dit beperkte aanbod is ongeveer 10 minuten.

4.4 Besluit

Dit hoofdstuk introduceerde de gevalstudie waar deze masterproef op gebaseerd is. De keuze voor het kruispunt werd toegelicht. Praktische overwegingen en het feit dat voldoende verkeer aanwezig moet zijn voor het activeren van beperkingen, zijn twee belangrijke factoren bij de keuze. Het tweede onderdeel geeft aan hoe de modelconfiguratie van het kruispunt is opgesteld. Dit leidt tot de identificatie van vijf ingaande schakels, drie uitgaande schakels, twee afslagfracties en drie conflictpunten. Ten slotte wordt in het derde onderdeel wat dieper ingegaan op de metingen zelf. Er werd gebruik gemaakt van drie cameraposities waarvan één camera tot op een hoogte van 13 meter kon gebracht worden. Uit de tellingen van stromen over het kruispunt en observaties van filevorming en fileterugslag, kunnen alle benodigde variabelen bepaald worden.

Hoofdstuk 5: Algemene aanpak van de kalibratie

Dit hoofdstuk heeft het doel om de algemene werking van de kalibratiemodellen uit te leggen. In sectie 5.1 wordt aangegeven welke parameters in aanmerking komen voor een kalibratie en welke uiteindelijk gekozen worden. Sectie 5.2 bespreekt de algemene opbouw van de kalibratiemodellen. Eerst wordt de algemene structuur van een kalibratie toegelicht. Vervolgens wordt wat dieper ingegaan op het gebruikte optimalisatiealgoritme en de gebruikte doelfunctie. Ten slotte is aangegeven hoe de kwaliteit van de resulterende fit beoordeeld kan worden. Sectie 5.3 bespreekt de keuze van de verschillende kalibratietypes.

5.1 Parameters binnen het knoopmodel

Voor een kalibratie van het knoopmodel kan gebeuren, is het noodzakelijk om even na te denken over alle variabelen die in aanmerking komen om door de kalibratie bepaald te worden. In dit onderdeel worden deze parameters besproken en wordt een indeling gemaakt die bepaalt welke parameters al dan niet meegenomen worden in de kalibratie en waarom.

De parameters waar deze masterproef op focust, zijn diegene die mee de prioriteit bepalen van de betrokken voertuigstromen. Deze parameters kunnen geïdentificeerd worden door vergelijkingen 26 tot 35 te raadplegen:

- de capaciteiten van ingaande en uitgaande schakels (C_i en C_j)
- de bezettijd (t_{ik}): tijd nodig om vanuit ingaande schakel i conflictpunt k te overbruggen
- de gewichten w_{ij} en w_{ik}
- de parameters α_{ij} en α_{ik} die de prioriteit weergeven
- de α_i variabelen die kunnen berekend worden met boven vernoemde variabelen

De variabelen N_k , f_{ij} en f_{ik} zijn niet opgenomen in de lijst omdat deze niet te kalibreren zijn. N_k is gelijk aan 3600 s/u, tenzij meerdere voertuigen op hetzelfde

moment gebruik kunnen maken van een intern conflictpunt. De variabelen f_{ij} en f_{ik} worden eenduidig bepaald uit de metingen.

Om de complexiteit ietwat te beperken, is beslist om de capaciteiten C_i en C_j niet te kalibreren. Dan moeten op de een of andere manier waarden gekozen worden voor deze parameters. In sectie 4.3 werd reeds toegelicht waarom het niet mogelijk om geschikte waarden te halen uit de metingen. Vandaar dat een waarde van 1800 pae/u gekozen wordt voor de capaciteiten.¹ Daarmee komen dus de parameters t_{ik} , w_{ij} , w_{ik} , α_{ij} , α_{ik} en α_i in aanmerking voor een kalibratie.

Een indeling van verschillende kalibratietypes kan gemaakt worden. Er kan namelijk een onderscheid gemaakt worden tussen een 'bovenliggend' en een 'onderliggend' niveau. Het bovenliggende model heeft het doel om rechtstreeks de waarden voor α_i te bepalen. Dat betekent dat waarden voor de gewichten of de prioriteringsparameters α_{ij} en α_{ik} hier niet aan bod komen. De enige parameters die op dit niveau gekalibreerd worden, zijn de t_{ik} parameters en de α_i parameters. Het onderliggende niveau focust zich dan op de kalibratie van t_{ik} , w_{ij} , w_{ik} , α_{ij} en α_{ik} . Op dit niveau zal de waarde van α_i gelijk zijn aan de waarde die bekomen wordt met vergelijkingen 26 tot 35. α_i wordt dus niet rechtstreeks gekalibreerd. Binnen het bovenliggende en onderliggende model wordt er ook nog geëxperimenteerd met het al dan niet opnemen van de t_{ik} parameters in de kalibratie.

5.2 Opbouw kalibratiemodel

In dit onderdeel wordt de algemene structuur van het kalibratiemodel toegelicht. Alle kalibratiemodellen die in Hoofdstuk 6 en 7 worden besproken, zijn gebaseerd op dit algemene model. Het model is geprogrammeerd in Matlab (versie R2009b). Alle gebruikte Matlab code is te raadplegen in de elektronische bijlagen.

5.2.1 Structuur van het kalibratiemodel

In dit onderdeel wordt beschreven hoe het kalibratieproces precies in zijn werk gaat. Eerst en vooral zijn een aantal invoergegevens vereist voor het succesvol uitvoeren van het kalibratie programma. Deze invoergegevens bestaan vooreerst uit de vraag, het aanbod (zowel intern als extern), de afslagfracties f_{ij} en f_{ik} en de uitstroom vanuit de ingaande schakels. Dit zijn zaken die simpelweg uit metingen te verkrijgen zijn en dan ook geaggregeerd zijn per tijdstap.

Vervolgens behoren ook de capaciteit van in- en uitgaande schakels tot de in te voeren gegevens. Deze hoeven echter niet per tijdstap gespecificeerd te worden aangezien dit eigenschappen zijn van het netwerk. Ten slotte is het ook noodzakelijk

¹ De 'Traffic Signal Timing Manual' [8] geeft aan dat de afrijcapaciteit per rijstrook van 1500 tot 2000 pae/u kan variëren. 1800 pae/u zou dus een aanvaardbare waarde zijn.

om aan te geven hoeveel voertuigen tegelijk gebruik kunnen maken van elk (intern) conflictpunt. Soms kunnen immers meerdere voertuigen vanuit dezelfde ingaande schakel het kruispunt oversteken. Het is echter aanbevolen om hier heel voorzichtig mee te om te springen. De manier waarop een intern punt gebruikt wordt, hangt immers vaak af van de drukte op het kruispunt en van het rijgedrag van individuele bestuurders. Bij de definitie van het aantal voertuigen dat tegelijk gebruik kan maken van het conflictpunt, wordt ook verondersteld dat deze uit eender welke richting kunnen komen. Wanneer verkeerdelijk wordt aangenomen dat meerdere voertuigen het intern conflictpunt kunnen gebruiken, leidt dit tot een grote overschatting van de verkeersstromen over het kruispunt.

Na het inlezen van alle invoergegevens, kan de eigenlijke kalibratie van start gaan. Eerst wordt aangegeven hoeveel variabelen zullen worden gekalibreerd in deze kalibratie. Dit varieert naargelang het soort kalibratie en het aantal tijdstappen dat beschouwd wordt. Wanneer immers aangenomen wordt dat een te kalibreren parameter varieert over de tijdstappen heen, moet per tijdstap een afzonderlijke parameter gedefinieerd worden. Dit wordt geïllustreerd in Hoofdstuk 6, waar elk kalibratiemodel meer in detail besproken wordt. Na de bepaling van het aantal te kalibreren parameters, moet nagedacht worden over de beperkingen die gelden voor deze parameters. De beperkingen, onder- en bovengrenzen kunnen aangegeven worden zoals toegelicht in 5.2.2.

Vervolgens wordt een startwaarde gedefinieerd voor elke parameter die gekalibreerd wordt. Het knooppmodel wordt uitgevoerd voor de gekozen startwaarden en de waarde van de doelfunctie wordt berekend. De verantwoording voor de keuze van de doelfunctie is te vinden in sectie 5.2.3 en 6.2.

Het zoeken naar de meest geschikte set van parameters wordt gedaan door de functie 'fmincon' (sectie 5.2.2). Binnen de functie fmincon zal een iteratief proces telkens nieuwe parameterwaarden genereren, de doelfunctiewaarde berekenen en de vector met parameterwaarden bijsturen. Het resultaat dat de functie fmincon genereert, bestaat uit een vector met een waarde voor elke parameter. Daarnaast wordt ook de doelfunctiewaarde die hoort bij dit eindresultaat, geregistreerd.

Bij het testen van een aantal verschillende kalibratiemodellen is gebleken dat het algoritme regelmatig vast komt te zitten in een lokaal optimum. Dit komt doordat de doelfunctie van deze optimalisatie vaak sterk niet-convex is. Vandaar dat om de kalibratie heen nog een lus is gebouwd die een aantal verschillende vectoren van startwaarden genereert waarvan de optimalisatiefunctie kan vertrekken. Iedere combinatie van startwaarden leidt tot een oplossing. Aan de hand van de doelfunctiewaarde, kan de beste oplossing geselecteerd worden.

5.2.2 Optimalisatiealgoritme: fmincon

Bij het kalibreren wordt gebruik gemaakt van de functie 'fmincon' in Matlab. Deze functie vindt het minimum van een niet-lineaire multivariate doelfunctie, rekening houdend met beperkingen. Gegeven een vector met schattingen van de gezochte

variabelen, zoekt deze functie het minimum van een scalaire doelfunctie van deze variabelen. De functie `fmincon` houdt rekening met beperkingen als $A \cdot x \leq b$ en $A \cdot x = b$ met A een zelfgekozen matrix, x de set van parameters die dient geoptimaliseerd te worden en b een vector van constante waarden. Ook ondergrenzen en bovengrenzen voor de parameters kunnen aangegeven worden in deze functie. Het is belangrijk om op te merken dat dit algoritme niet gegarandeerd een globaal optimum zal vinden. Wanneer de oplossingsruimte niet convex is, kan het algoritme vast raken in een lokaal optimum. Het gebruik van verschillende startwaarden, kan hier wel een oplossing bieden. Wanneer een aantal variabelen niet lijken bij te dragen tot een vermindering in de doelfunctiewaarde, zal de optimalisatie deze zo groot mogelijk maken. Hierbij wordt dan uiteraard rekening gehouden met beperkingen, onder- en bovengrenzen.

5.2.3 Doelfunctie

Het optimalisatiealgoritme `fmincon` probeert de scalaire waarde van een doelfunctie te minimaliseren. In dit onderdeel wordt een eerste term gedefinieerd die deel uitmaakt van de doelfunctie. Daarna worden nog twee termen gedefinieerd die deel zouden kunnen uitmaken van de doelfunctie. Ook combinaties van deze termen kunnen gebruikt worden. Het onderzoek in sectie 6.2 toont aan welke termen het interessantst zijn.

Eerste term: stroomverschil

De eerste term van de doelfunctie is geformuleerd in vergelijking 36. Bij elke iteratie van de functie `fmincon`, wordt een set van parameters bepaald. Hiervoor worden de stromen vanuit de ingaande schakels over het kruispunt berekend met het knooppuntmodel. Het absolute verschil van deze stromen met de meetwaarden wordt genormaliseerd en vermenigvuldigd met 100. De schaalfactor van 100 wordt louter toegepast om de visuele voorstelling te verbeteren. Deze bekomen waarde wordt gesommeerd over alle ingaande schakels en over alle tijdstappen heen. Deze term vormt de basis van de doelfunctie en wordt kleiner naarmate de berekende stromen dichter bij de gemeten stromen liggen.

$$stroomverschil = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I 100 \frac{|q_{meting,i}(t) - q_{model,in,i}(t)|}{q_{meting,i}(t)} \quad (36)$$

Tweede term: bezetting interne conflicten

De invoer van de kalibratie bevat een matrix die met behulp van 0/1 waarden per tijdstap aangeeft of een intern conflict punt niet of wel volledig wordt opgebruikt. Deze matrix bevat dus een aantal kolommen dat gelijk is aan K , dat is het aantal interne conflict punten. Het aantal rijen is dan gelijk aan het aantal tijdstappen dat beschouwd wordt. De matrix kan ingevuld worden door het beeldmateriaal te bekijken en visueel na te gaan welke conflict punten voortdurend benut worden.

Dit gegeven wordt gebruikt bij het bepalen van de tweede term van de doelfunctie. In elke iteratie van het optimalisatiealgoritme *fmincon* kan namelijk ook zo een matrix opgesteld worden. Deze matrix baseert zich dan op de stromen die resulteren uit de parameterkeuze van die iteratie en de bezettijden die ofwel ook gekalibreerd worden ofwel een vaste waarde krijgen. Vervolgens kunnen de twee matrices vergeleken worden.

Wanneer een conflictpunt in een bepaalde tijdstap in realiteit wel volledig wordt benut maar volgens de modeloplossing nog wat overschot heeft, wordt een soort 'strafterm' bepaald. Vergelijkingen 37 en 38 geven aan hoe deze 'strafterm' berekend wordt. Met vergelijking 37 kan de bezetting van elk conflictpunt berekend worden. Deze bezetting, berekend per tijdstap per conflictpunt, geeft aan hoeveel seconden van de tijdstap het conflictpunt bezet is. Vergelijking 38 berekent dan de 'strafterm' door het absolute verschil tussen de totale bezetting en het totale aanbod op het conflictpunt te normaliseren en te vermenigvuldigen met 100.

Uiteraard kan het ook zijn dat een conflictpunt in werkelijkheid niet volledig wordt benut maar dit volgens het model wel het geval is. In dat geval wordt een 'strafterm' van 100 geteld bij de doelfunctie. Het is in dit geval niet mogelijk om een 'strafterm' op te stellen, gelijkaardig aan deze van vergelijking 38. Hiervoor is het immers noodzakelijk om te weten wat het verschil is tussen de werkelijke bezettijd en de bezettijd die resulteert uit het model. De bezettijd die resulteert uit het model zou kunnen berekend worden met behulp van formule 37. Het is echter de werkelijke bezettijd die niet altijd gekend is in dit geval, namelijk wanneer de bezettijden mee gekalibreerd worden.

$$bezetting\ conflictpunt(k,t) = \sum_{i=1}^I t_{ik} f_{ik} q_{model,in,i}(t) \Delta t \quad (37)$$

$$interne\ penalisering = 100 \frac{\left| \frac{3600s}{u} \Delta t - bezetting\ conflictpunt(k,t) \right|}{\frac{3600s}{u} \Delta t} \quad (38)$$

Derde term: bezetting externe conflicten

Voor de externe beperkingen is een matrix, analoog aan deze voor de interne beperkingen, opgesteld. Deze matrix heeft dan een aantal kolommen dat gelijk is aan *J*, het aantal uitgaande schakels. Opnieuw kan deze matrix ingevuld worden door de videobeelden te bekijken en per tijdstap te beslissen van welke uitgaande schakels het aanbod volledig wordt benut.

Bij het bepalen van de derde term, wordt van deze matrix gebruik gemaakt. Wanneer het aanbod in realiteit volledig benut wordt en de keuze van de parameters resulteert in een onvolledige benutting van het aanbod, dan kan vergelijking 39 gebruikt worden om de 'strafterm' te bepalen. Voor de betreffende uitgaande schakel wordt het absolute verschil bepaald tussen het aanbod en de uitstroom in de

uitgaande schakel, berekend volgens het model. Opnieuw wordt dit verschil genormaliseerd en geschaald met factor 100. Deze term wordt bepaald per tijdstap.

In theorie zou vergelijking 39 ook kunnen gebruikt worden voor het geval dat het aanbod in werkelijkheid niet volledig wordt benut maar dit volgens het model wel het geval is. Om echter dezelfde procedure te volgen zoals bij de tweede term, wordt in dit geval ook een constante 'strafterm' van 100 toegekend.

$$\text{externe penalisering} = 100 \frac{|R_j(t) - q_{\text{model,uit},j}(t)|}{R_j(t)} \quad (39)$$

In het voorgaande werden drie termen gedefinieerd. De eerste term vormt de basis van de doelfunctie. Vraag is of de tweede en derde term een nuttige toevoeging zijn, m.a.w. of deze zorgen voor een snellere of betere convergentie naar een absoluut minimum. Vier varianten van de doelfunctie kunnen onderscheiden worden:

- stroomverschil (basisfunctie)
- stroomverschil en interne penalisering (variant 1)
- stroomverschil en externe penalisering (variant 2)
- stroomverschil, interne penalisering en externe penalisering (variant 3)

Om de kwaliteit van de vier opties te beoordelen, worden de prestaties van deze vier opties vergeleken voor de zes kalibratieprogramma's die in sectie 5.3 gedefinieerd worden. De analyse van deze vergelijking is uitgewerkt in sectie 6.2.

5.2.4 Hoe kwaliteit van de fit beoordelen

Het doel van de kalibratie is om een set van parameters te vinden die kunnen gebruikt worden in het model om de voertuigstromen over een kruispunt te bepalen. Om de kwaliteit van deze kalibratie te beoordelen, is het dan ook aangewezen om het verschil tussen de berekende en de gemeten voertuigstromen te bekijken. Vermits dit verschil verwerkt zit in de doelfunctie, kan de doelfunctiewaarde gebruikt worden om de kwaliteit van de kalibratie te beoordelen.

Naast het verschil tussen de berekende en gemeten voertuigstromen, zijn er nog een aantal zaken die iets zeggen over de kwaliteit van de fit. Wanneer met de gekalibreerde parameters opnieuw de uitstroom over het kruispunt berekend wordt, kan ook nagekeken worden of files aanwezig zijn op dezelfde schakels en hetzelfde moment als bij de metingen en of de juiste beperkingen actief zijn. Ten slotte is het ook belangrijk dat de gekalibreerde variabelen een enigszins plausibele waarde aannemen.

5.3 Aanpak

Zoals eerder vermeld, wordt een onderscheid gemaakt tussen een bovenliggend en een onderliggend kalibratieniveau. Deze indeling kan nog iets verder gespecificeerd worden:

- Bovenliggend model
 - o Kalibratie van de α_i parameters
 - o Kalibratie van de α_i parameters en de t_{ik} parameters
- Onderliggend model
 - o Kalibratie van de α_{ij} en α_{ik} parameters
 - o Kalibratie van de α_{ij} en α_{ik} parameters en de t_{ik} parameters
 - o Kalibratie van de w_{ij} en w_{ik} parameters
 - o Kalibratie van de w_{ij} en w_{ik} parameters en de t_{ik} parameters

In het bovenliggende kalibratiemodel spelen de α_{ij} , α_{ik} , w_{ij} en w_{ik} parameters geen rol. Er wordt rechtstreeks gekalibreerd op de α_i parameters, waarvan de ratio's dan de stromen bepalen. Het is nuttig om een kalibratie uit te voeren op dit bovenliggend niveau omdat zo duidelijk wordt of er een eenduidige relatie is tussen de keuze van de α_i parameters en de uitstroom. Wanneer er op dit niveau al speling zit op de α_i parameters, is het duidelijk dat ook op het onderliggende niveau speling zal aanwezig zijn. Twee varianten kunnen onderscheiden worden op dit bovenliggende niveau. In een eerste variant worden enkel de α_i parameters gekalibreerd en worden vaste waarden gekozen voor de t_{ik} parameters. Een tweede variant laat de t_{ik} parameters ook vrij.

In het onderliggende niveau worden de α_i parameters berekend uit de gekalibreerde α_{ij} en α_{ik} of w_{ij} en w_{ik} parameters. Op die manier kan een vergelijking gemaakt worden tussen de werking en validiteit van het boven- en onderliggende niveau. Vier varianten kunnen onderscheiden worden. In een eerste variant worden de α_{ij} en α_{ik} variabelen gekalibreerd, met vaste waarden voor de t_{ik} parameters. Voor het bepalen van de w_{ij} en w_{ik} parameters, worden de theoretische formules 32 tot 35 gebruikt. In een tweede variant worden de t_{ik} parameters mee gekalibreerd. Voor de w_{ij} en w_{ik} parameters worden nog steeds de theoretische waarden aangehouden. Een derde variant gooit het over een andere boeg. Deze keer worden namelijk de w_{ij} en w_{ik} parameters gekalibreerd in plaats van de α_{ij} en α_{ik} variabelen. Voor de α_{ij} en α_{ik} variabelen worden beredeneerde waarden gekozen. Ook de t_{ik} parameters worden in deze variant vast gekozen. In de vierde variant worden de w_{ij} en w_{ik} parameters gekalibreerd, samen met de t_{ik} parameters. De α_{ij} en α_{ik} variabelen worden nog steeds zelf gekozen.

De vraag rijst, waarom de α_{ij} en α_{ik} variabelen niet tegelijk gekalibreerd worden met de w_{ij} en w_{ik} parameters. Deze manier van kalibreren zou immers de voorkeur genieten mocht dit bruikbare resultaten opleveren. Na onderzoek is gebleken dat dit niet het geval is. Dit soort kalibratie bevat immers te veel vrijheidsgraden om tot een eenduidige oplossing te komen. De reden waarom alle kalibraties ook eens met en

zonder kalibratie van de t_{ik} parameters gedaan worden, is om de validiteit van vergelijking 19 te onderzoeken. Als de t_{ik} parameters bij het kalibreren vastgelegd worden volgens vergelijking 19 en de kalibratie geeft een goede fit, dan kan besloten worden dat vergelijking 19 een goede aanname is. Indien deze kalibratie een slechte fit geeft, kan het interessant zijn om de t_{ik} parameters eens mee te kalibreren. Als dan wel een goede fit verkregen wordt, kunnen resulterende t_{ik} parameters nader bekeken worden en misschien stof geven tot het ontwerp van een nieuwe definitie.

5.4 Besluit

Dit hoofdstuk introduceert de algemene opbouw van de kalibratiemodellen. De kalibraties zullen zich richten op het bepalen van de voorrangsparementers α_i , α_{ij} en α_{ik} , de gewichten w_{ij} en w_{ik} en de bezettijden t_{ik} . Voor de capaciteiten wordt een vaste waarde van 1800 vtg/uur aangenomen. Met behulp van het optimalisatiealgoritme `fmincon`, wordt de vector met te kalibreren parameters geoptimaliseerd. Dit gebeurt aan de hand van een doelfunctie die op verschillende manieren kan geformuleerd worden. Welke doelfunctie het best werkt, is onderzocht in sectie 6.2. Uit de kalibratie resulteert een set van parameters. De kwaliteit van de fit kan onderzocht worden door te kijken naar de doelfunctiewaarde die de afwijking tussen de metingen en de gekalibreerde voertuigstromen weergeeft. Daarnaast kunnen ook de verschillen tussen geactiveerde conflictpunten inzichten opleveren. Ten slotte is het ook belangrijk dat de gekalibreerde parameters een plausibele waarde aannemen. In het laatste onderdeel van dit hoofdstuk wordt de hiërarchie van de verschillende kalibratieprogramma's toegelicht.

Hoofdstuk 6: Kalibratie van het testscenario

In dit hoofdstuk worden de verschillende types kalibratiemodellen uitgetest op een zelf ontworpen testscenario. In sectie 6.1 wordt de opbouw van dit scenario besproken. Vervolgens wordt in sectie 6.2 onderzocht welke doelfunctie het best werkt voor deze kalibraties. De eigenlijke kalibraties van het testscenario worden besproken in secties 6.3 en 6.4. Sectie 6.3 richt zich op het bovenliggende niveau met de kalibratie van de α_i en t_{ik} parameters. Sectie 6.4 bespreekt het onderliggende niveau, waarbij de α_{ij} , α_{ik} , w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} parameters gekalibreerd worden.

6.1 Opstellen van het testscenario

In dit onderdeel wordt eerst een algemeen overzicht gegeven van de opbouw van het scenario en de gebruikte werkwijze. Vervolgens wordt het hele scenario doorgerekend.

6.1.1 Algemeen overzicht van het scenario en werkwijze

Het is de bedoeling om alle kalibraties eerst te testen met behulp van een zorgvuldig gekozen testscenario. Dit testscenario bestaat uit een reeks van vijf tijdstappen die elk vijftien minuten duren. Elke tijdstap heeft een vraag, aanbod en afslagfracties die gedurende de hele tijdstap constant blijven. De vraag, het aanbod en de afslagfracties van de verschillende tijdstappen zijn zo gekozen, dat verschillende externe en interne beperkingen geactiveerd worden. Een overzicht van alle tijdstappen met bijhorende gegevens en berekeningen, is bijgevoegd in Appendix A.

Om het testscenario op te stellen, worden eerst de voorrangsparements α_{ij} en α_{ik} gedefinieerd. Vervolgens worden de gewichten bepaald. Dit door gebruik te maken van de vergelijkingen 32 tot 35. Ten slotte kunnen dan ook de α_i parameters bepaald worden met behulp van vergelijking 26. Na het kiezen van een vraagpatroon en het aanbod per tijdstap, kan het model de uitstroom gaan berekenen per tijdstap. Als dit gebeurd is, zijn alle gegevens van het testscenario gekend.

6.1.2 Berekenen van testscenario

In dit onderdeel wordt de opbouw van het testscenario tot in detail besproken. Vertrekkende van Figuur 5 en van de geldende voorrangsregels op dit kruispunt, worden waarden gekozen voor de α_{ij} en α_{ik} parameters (vergelijking 40 en 41). Wanneer een parameter de waarde 0 krijgt, betekent dit dat deze niet van toepassing is in dit concrete geval.² Merk op dat enkel gebruik gemaakt is van de waardes 0,2 en 0,8. De waarde 0,2 wordt gebruikt wanneer de ingaande schakel geen voorrang heeft in het externe of interne conflict. De waarde van 0,8 wordt gebruikt bij ingaande schakels die voorrang hebben op alle andere stromen wat betreft een bepaald conflictpunt. Extreme waarden zoals ε en $1-\varepsilon$ kunnen eventueel ook gebruikt worden. Maar dan gaat men uit van de veronderstelling dat de voorrangsregels altijd perfect gevolgd worden. Het gedrag ten opzichte van de voorrangsregels hangt echter sterk af van de bestuurder en de drukte op het kruispunt. Vandaar de keuze voor deze parameters. Andere combinaties van parameters zijn ook zeker mogelijk.

$$\alpha_{ij} = \begin{bmatrix} 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 \\ 0 & 0,8 & 0,8 \\ 0,8 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\alpha_{ik} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,2 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0,8 \\ 0,8 & 0 & 0 \\ 0 & 0,8 & 0,2 \end{bmatrix} \quad (41)$$

Vervolgens moet ook de t_{ik} matrix gedefinieerd worden (vergelijking 42). De keuze voor een bezettijd van 4 seconden is arbitrair.

$$t_{ik} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \\ 4 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 4 \end{bmatrix} \quad (42)$$

Ook aan de capaciteiten van ingaande en uitgaande schakels, moet een waarde toegekend worden. Deze wordt voor alle schakels gelijkgesteld aan 1500 pae/u (vergelijking 43 en 44). Ook dit is een beredeneerde maar toch arbitraire waarde. Andere invullingen zijn ook mogelijk.

$$C_i = [1500 \quad 1500 \quad 1500 \quad 1500 \quad 1500] \quad (43)$$

² Merk op dat een 0 in deze matrices hier dus niet wijst op de laagste prioriteit van 0. Met een prioriteit van 0 kan het model immers niet omgaan. In theorie kan deze waarde wel voorkomen.

$$C_j = [1500 \quad 1500 \quad 1500] \quad (44)$$

Ten slotte moeten ook de vraag en het aanbod bepaald worden en dit per tijdstap (vergelijking 45 en 46). Elke rij staat voor een nieuwe tijdstap. In de matrix van de vraag staat elke kolom voor een ingaande schakel. In de matrix van het aanbod staat elke kolom voor een uitgaande schakel. De matrices f_{ij} en f_{ik} geven de afslagfracties weer voor de uitgaande schakels en de interne conflictpunten. Iedere rij staat voor een ingaande schakel. In de matrix f_{ij} staat elke kolom voor een uitgaande schakel, in de matrix f_{ik} staat elke kolom voor een intern conflictpunt (met nummering zoals in Figuur 5). De variabele f_{33} heeft dezelfde waarde in de matrices f_{ij} en f_{ik} . f_{32} en f_{33} zijn voorgesteld als onbekenden omdat deze variëren over de tijdstappen heen. De matrix 'afslagfracties' in vergelijking 49 geeft de waardes voor deze afslagfracties weer per tijdstap. De vijf rijen staan voor de vijf tijdstappen. De eerste kolom geeft de waarden voor f_{32} , de tweede kolom geeft de waarde voor f_{33} .

$$vraag = S = \begin{bmatrix} 20 & 160 & 60 & 10 & 120 \\ 100 & 90 & 300 & 190 & 20 \\ 90 & 70 & 100 & 155 & 180 \\ 50 & 60 & 300 & 200 & 170 \\ 90 & 70 & 80 & 160 & 50 \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$aanbod = R = \begin{bmatrix} 375 & 375 & 375 \\ 375 & 375 & 375 \\ 375 & 375 & 375 \\ 375 & 375 & 375 \\ 375 & 50 & 375 \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$f_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & f_{32} & f_{33} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$f_{ik} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & f_{33} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$afslagfracties = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 \\ 0,3 & 0,7 \\ 0,6 & 0,4 \\ 0,7 & 0,3 \\ 0,5 & 0,5 \end{bmatrix} \quad (49)$$

Met behulp van vergelijkingen 26 tot 35, kunnen nu de waardes berekend worden voor w_{ij} , w_{ik} en α_i . De waarde voor w_{ij} (w_{ik}) wordt gelijk gesteld aan 0 wanneer f_{ij} (f_{ik}) gelijk is aan 0. De w_{ij} en w_{ik} matrices zijn gerapporteerd in Appendix B.

De resulterende waarden voor α_i zijn te vinden in vergelijking 50. Elke rij stelt een tijdstap voor en elke kolom staat voor een ingaande schakel. De reden waarom ingaande schakels 1 tot 4 voor iedere tijdstap dezelfde α_i hebben, is het feit dat de α_{ij} en α_{ik} waarden vanuit deze schakels gelijk zijn voor elk intern en extern conflict (als die verschillend zijn van 0). Dat maakt dat de weging van deze variabelen met de gewichten, eigenlijk geen effect heeft.

$$\alpha_i(t) = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & 0,5571 \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & 0,5319 \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & 0,5713 \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & 0,5866 \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & 0,5571 \end{bmatrix} \quad (50)$$

Met behulp van het knoopmodel kan nu de uitstroom over het kruispunt berekend worden voor elke tijdstap. Deze uitstroom is te vinden in vergelijking 51. Elke rij representeert een tijdstap en elke kolom stelt een ingaande schakel voor.

$$q_i(t) = \begin{bmatrix} 20 & 105 & 60 & 10 & 120 \\ 100 & 45 & 293 & 180 & 20 \\ 90 & 58 & 100 & 155 & 167 \\ 50 & 45 & 218 & 180 & 160 \\ 90 & 65 & 42 & 160 & 29 \end{bmatrix} \quad (51)$$

6.2 Keuze van de doelfunctie

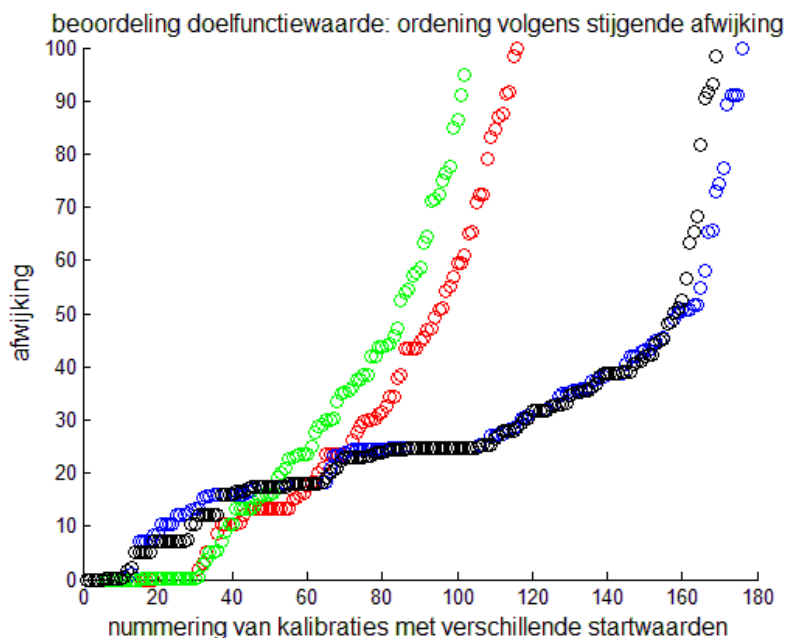
Deze sectie beoordeelt de vier voorgestelde doelfuncties uit sectie 5.2.3. De data die hierbij gebruikt worden, zijn deze van het testscenario. Voor elk van de zes kalibratieprogramma's worden de vier opties uitgetest met telkens 200 verschillende startwaarden. Bij de beëindiging van elke kalibratie wordt de prestatie beoordeeld. Dit wordt gedaan met behulp van formule 52. Hoe hoger de afwijking is, hoe verder de berekende stromen liggen van de werkelijke stromen en dus hoe slechter het resultaat is.

$$afwijking = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I |q_{meting,i}(t) - q_{model,in,i}(t)| \quad (52)$$

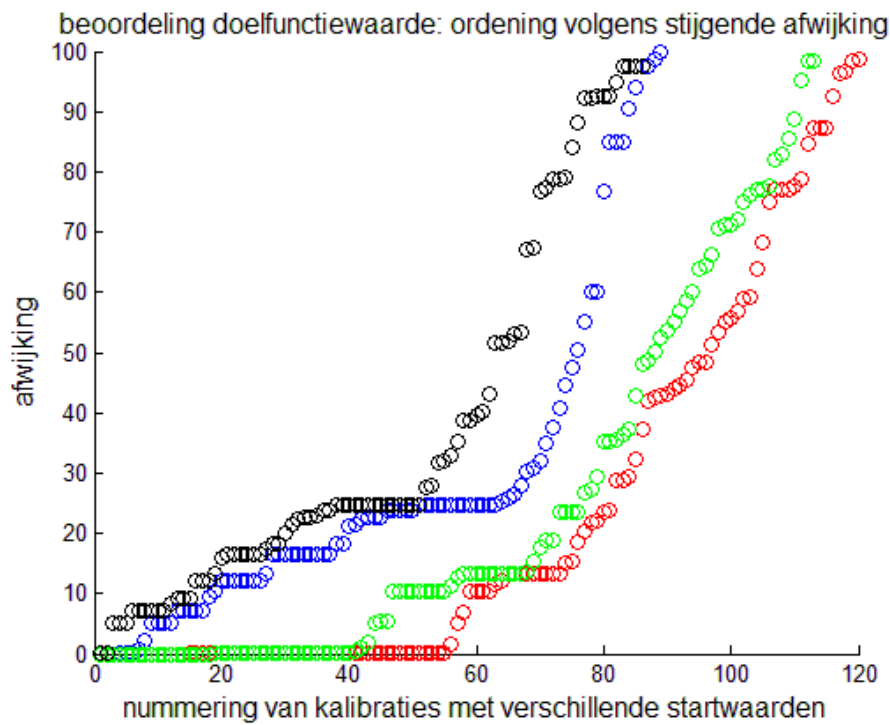
Wanneer alle 200 kalibraties uitgevoerd zijn, worden de waarden voor de afwijking geordend van klein naar groot. Dit wordt gedaan per kalibratieprogramma en per doelfunctievariant. Wat betreft de α_i kalibratie, toont dit experiment aan dat alle doelfuncties bij meer dan 160 van de 200 kalibraties een afwijking leveren van 0. Bij de kalibratie van α_{ij} en α_{ik} hebben alle doelfuncties zelfs bij meer dan 180 van de 200 kalibraties een afwijkingswaarde van 0. Bij de kalibratie van w_{ij} en w_{ik} zijn dat er 120. Hieruit blijkt dat deze drie kalibraties relatief gemakkelijk tot een globaal minimum komen.

De kalibraties die de t_{ik} parameters mee kalibreren, hebben het moeilijker om een globaal minimum te bereiken. Dit blijkt uit Figuur 6, Figuur 7 en Figuur 8 die het verloop van de afwijking van de verschillende doelfuncties voor deze kalibraties weergeven. In eerste instantie lijkt dit vreemd: meer vrijheid (meer te kalibreren parameters) wordt toegevoegd aan het model en toch blijkt het lastiger om tot een globaal minimum te komen. Bij de kalibraties waar de t_{ik} parameters niet worden mee gekalibreerd, is het echter zo dat deze de waarde krijgen waarmee het testscenario is doorgerekend. Wanneer deze parameters dan mee gekalibreerd worden, is de oplossingsruimte meteen heel wat groter. Een toename aan lokale optima waarin de kalibratie verzeild geraakt, verhoogt het aantal hindernissen om tot een globaal optimum te komen.

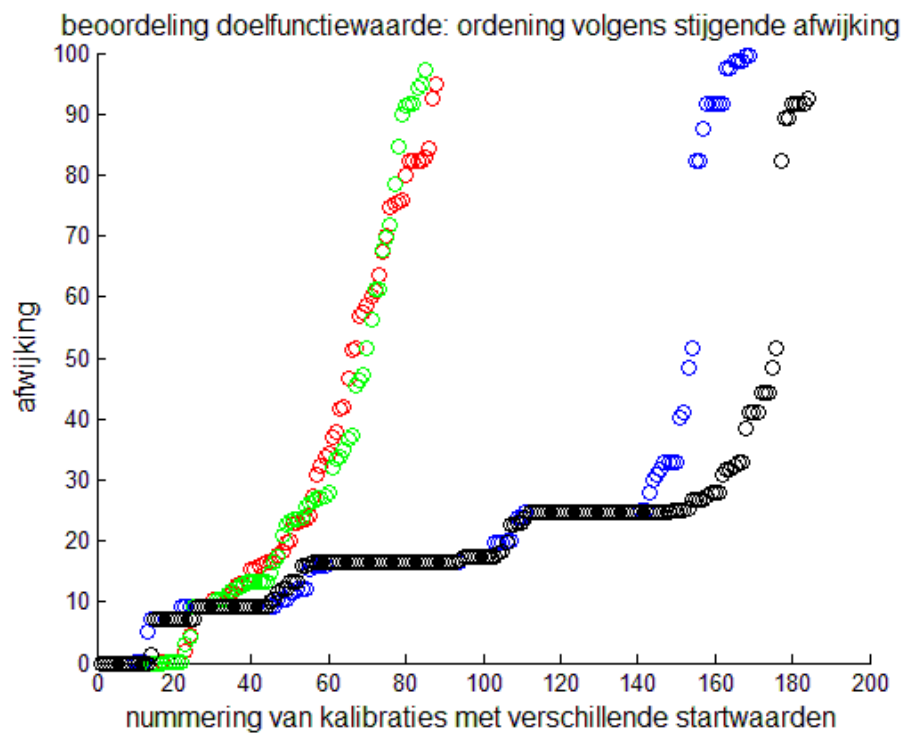
Voor de zichtbaarheid zijn enkel die resultaten geplot die een afwijking hebben die kleiner is dan 100. De zwarte curves stellen de basisfunctie voor. Variant 1 is weergegeven in het rood, variant 2 is weergegeven in het blauw en variant 3 is weergegeven in het groen. De vaststelling die kan gemaakt worden is dat variant 1 en 3 (rode en groene curve) het langst bij een waarde van 0 blijven hangen. Ook kan opgemerkt worden dat deze curves een veel sterkere stijging hebben dan de blauwe en de zwarte curve. Aangezien het de bedoeling is om bij het kalibreren met zo weinig mogelijk verschillende startwaarden tot een minimum te komen, zal de rode curve het interessantst zijn. Deze blijft in Figuur 7 immers nog iets langer bij de 0 hangen dan de groene curve. Dat betekent dat variant 1, de basisfunctie gecombineerd met de penaliserende op interne beperkingen, de interessantste doelfunctie oplevert. Voor het vervolg van deze masterproef wordt dan ook verder gewerkt met deze functie.



Figuur 6: prestatie van verschillende doelfuncties voor kalibratie van α_i en t_{ik} (zwart=basisfunctie, rood=variant 1, blauw=variant 2, groen=variant 3)



Figuur 7: prestatie van verschillende doelfuncties voor kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} (zwart=basisfunctie, rood=variant 1, blauw=variant 2, groen=variant 3)



Figuur 8: prestatie van verschillende doelfuncties voor kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} (zwart=basisfunctie, rood=variant 1, blauw=variant 2, groen=variant 3)

6.3 Kalibratie van bovenliggend model

In dit onderdeel wordt de toepassing van twee kalibraties op het testscenario besproken. In sectie 6.3.1 is de kalibratie van de α_i parameters uitgewerkt. Hierbij worden de theoretische t_{ik} parameters, gedefinieerd in sectie 6.1.2, gebruikt. De tweede kalibratie voegt deze t_{ik} parameters ook toe aan de te kalibreren parameters.

6.3.1 Kalibratie van α_i

Keuze van te kalibreren parameters en beperkingen

Het is belangrijk om na te denken voor welke parameters een kalibratie nuttig zou zijn. Hiervoor kan best even teruggeblikt worden op de figuren van de verschillende tijdstappen in Appendix A. Wanneer een conflictpunt immers niet volledig wordt benut, speelt de waarde van de α_i parameters geen rol omdat er voldoende plaats is voor de vraag vanuit alle ingaande schakels. Dat betekent dat het ook niet zinnig is om deze α_i waarden mee te nemen in een kalibratie. Wat betreft tijdstap 1 zou het dus interessant zijn om enkel de α_i parameters te kalibreren die een invloed hebben op conflictpunt 2. Dat zijn dan α_2 en α_5 . Aangezien enkel de verhouding van de parameters een rol speelt, wordt parameter α_2 vast gezet op een waarde van 0,2. α_5 is dan de enige parameter die gekalibreerd wordt in tijdstap 1. In tijdstap 2 zijn er twee conflictpunten die volledig benut worden. In conflictpunt 1, spelen α_2 en α_4 een rol en in conflictpunt 3 gaat het tussen α_3 en α_5 . Opnieuw worden twee parameters (α_2 en α_3) vastgezet op waardes van 0,2 en 0,8. Met behulp van een analoge redenering worden in tijdstap 3 de parameter α_5 en in tijdstap 4 en 5 de parameters α_4 en α_5 gekalibreerd. Vergelijking 53 geeft de resulterende vector van te kalibreren parameters. Het cijfer tussen haakjes geeft aan om welke tijdstap het gaat. Daarmee ziet de $\alpha_i(t)$ -matrix eruit zoals in vergelijking 54. Merk op dat de waarden van de parameters die vast worden gekozen, overeen komen met de waarden die berekend werden in 6.1. Aangezien deze parameters niet beslissend zijn in een conflict of slechts deel uitmaken van een ratio die beslissend is, kunnen eender welke waarden gekozen worden voor deze parameters.

$$te\ kalibreren\ parameters = \begin{bmatrix} \alpha_5(1) \\ \alpha_4(2) \\ \alpha_5(2) \\ \alpha_5(3) \\ \alpha_4(4) \\ \alpha_5(4) \\ \alpha_4(5) \\ \alpha_5(5) \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$\alpha_i(t) = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & \alpha_5(1) \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & \alpha_4(2) & \alpha_5(2) \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & \alpha_5(3) \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & \alpha_4(4) & \alpha_5(4) \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & \alpha_4(5) & \alpha_5(5) \end{bmatrix} \quad (54)$$

De vector met startwaarden voor deze parameters bestaat uit random getallen tussen 0 en 1. Daarnaast wordt met behulp van een onder- en bovengrens ook aangegeven dat de parameters tussen 0 en 1 horen te liggen.

Resultaten

In totaal werden 200 vectoren met startwaarden gegenereerd. Zoals reeds in sectie 6.2 besproken werd, levert het grootste deel van de kalibraties een doelfunctiewaarde op die gelijk is aan 0. Tabel 1 geeft per parameter aan wat de gemiddelde waarde en standaard deviatie is van alle kalibraties waarbij de doelfunctiewaarde kleiner is dan 1. Hierbij gaat het om een totaal van 173 kalibraties.

De 173 beste kalibraties geven allemaal een perfecte fit op de uitstroom. Dat is af te leiden uit de doelfunctiewaarde die voor al deze resultaten gelijk is aan 0.

Bij het interpreteren van de parameterwaarden, valt meteen iets op. Parameters $\alpha_4(2)$, $\alpha_5(3)$, $\alpha_4(4)$, $\alpha_5(4)$ en $\alpha_5(5)$ komen bij elke kalibratie terecht op exact dezelfde parameterwaarde als de theoretische waarde. Dat blijkt uit de standaarddeviatie die gelijk is aan 0 voor al deze parameters. Voor parameters $\alpha_5(1)$, $\alpha_5(2)$, $\alpha_4(5)$ is dit niet het geval. Deze parameters neigen naar de waarde van 0,5. De reden hiervoor is het feit dat deze laatste drie parameters op geen enkel conflictpunt de stromen over het kruispunt bepalen. Zoals in Appendix A ook uitgelegd wordt, maken deze parameters wel deel uit van de α_i -ratio op een conflictpunt dat volledig benut wordt. De uiteindelijke stromen worden echter gedomineerd door andere geldende beperkingen. Dit kan bijvoorbeeld een vraag zijn die kleiner is dan de toegelaten stroom over het conflictpunt. Een andere mogelijkheid is de aanwezigheid van een ander conflictpunt dat strengere beperkingen oplegt aan de stromen van het betreffende conflictpunt.

Het is nu duidelijk dat deze drie parameters geen eenduidige waarde zullen aannemen. Het lijkt alsof deze parameters toch naar een waarde van 0,5 toe gaan. Dit komt echter omdat het optimalisatie algoritme naar het midden van het onderzochte interval toe gaat, wanneer er geen eenduidige oplossing is.

Het is mogelijk om visueel te bepalen op welke conflictpunten de α_i ratio eenduidig kan bepaald worden. Als er twee ingaande schakels zijn die voertuigen kunnen sturen naar een conflictpunt (extern of intern), dan kan de ratio van de α_i parameters eenduidig bepaald worden wanneer op beide ingaande schakels een file staat gedurende de hele tijdstap. Hiervoor kan dan vergelijking 55 gebruikt worden. Wanneer er slechts op één ingaande schakel een vraagoverschot staat, kan een boven- of ondergrens bepaald worden voor de α_i verhouding (vergelijking 56).

$$\frac{q_i}{q_j} = \frac{\alpha_i}{\alpha_j} \quad (55)$$

$$\frac{q_i}{q_{i'}} \leq \frac{\alpha_i}{\alpha_{i'}} \quad (56)$$

Voor het testscenario kan op die manier berekend worden dat de verhouding van α_5 op α_2 in tijdstap 1 een ondergrens heeft van 1,143. De verhouding van α_3 tot α_5 in tijdstap 2 heeft een bovengrens van 14,65. De verhouding van α_4 tot α_2 heeft een ondergrens van 2,46.

Tabel 1: resultaten kalibratie α_i op testscenario

Parameters	Gemiddelde	Standaarddeviatie
$\alpha_5(1)$	0,4904	0,0515
$\alpha_4(2)$	0,8000	0,0000
$\alpha_5(2)$	0,5015	0,0591
$\alpha_5(3)$	0,5713	0,0000
$\alpha_4(4)$	0,8000	0,0000
$\alpha_5(4)$	0,5866	0,0000
$\alpha_4(5)$	0,5099	0,0236
$\alpha_5(5)$	0,5571	0,0000

6.3.2 Kalibratie van α_i en t_{ik}

Keuze van te kalibreren parameters en beperkingen

Deze kalibratie is gebaseerd op de voorgaande (6.3.1). De zes parameters van de t_{ik} matrix worden ook meegenomen in de kalibratie. Deze parameters blijven gelijk over alle tijdstappen heen. De vector met te kalibreren parameters ziet er dan uit zoals in vergelijking 57.

$$te\ kalibreren\ parameters = \begin{bmatrix} \alpha_5(1) \\ \alpha_4(2) \\ \alpha_5(2) \\ \alpha_5(3) \\ \alpha_4(4) \\ \alpha_5(4) \\ \alpha_4(5) \\ \alpha_5(5) \\ t_{21} \\ t_{22} \\ t_{33} \\ t_{41} \\ t_{52} \\ t_{53} \end{bmatrix} \quad (57)$$

De randvoorwaarden voor de α_i parameters blijven dezelfde. Wat betreft de t_{ik}

parameters, worden een onder- en bovengrens ingesteld die de waarden tussen 0 en 20 houden. Als startwaarde wordt een random getal gegenereerd tussen 0 en 10.

Resultaten

Tabel 2 geeft de resultaten van deze kalibratie. Opnieuw zijn 200 sets van startwaarden gebruikt. Reeds bij het onderzoek naar de meest geschikte doelfunctie in sectie 6.2, bleek dat deze kalibratie het moeilijker heeft om tot een set van parameters te komen die een perfecte fit geeft. De 26 resultaten met een doelfunctiewaarde kleiner dan 1, zijn weerhouden.

Wat betreft de interpretatie van de gekalibreerde parameters, gaat voor de α_i parameters precies dezelfde redenering op als diegene in sectie 6.3.1. Wat betreft de t_{ik} parameters, kan besloten worden dat deze het optimalisatie algoritme veel trager maken. Het globale optimum is ook moeilijker te vinden. De t_{ik} parameters blijken toch een eenduidige oplossing te hebben. Het feit dat de t_{ik} parameters telkens exact op de theoretische waarde terechtkomen, is te verklaren aan de hand van de doelfunctie. De doelfunctie stijgt wanneer de gekalibreerde uitstroom geen perfecte fit geeft met de 'gemeten' uitstroom. Wanneer de gekalibreerde uitstroom gelijk is aan de 'gemeten' uitstroom, is er nog een term in de doelfunctie die de bezetting van de interne conflictpunten bekijkt. De bezetting van een conflictpunt is gelijk aan de bezet tijd t_{ik} vermenigvuldigd met de stroom over dit punt. Wanneer de uitstroom reeds juist is gekalibreerd, moeten de waarden voor t_{ik} wel gelijk zijn aan de theoretische waarde om een doelfunctiewaarde van 0 te verkrijgen.

Tabel 2: resultaten kalibratie α_i en t_{ik} op testscenario

Parameters	Gemiddelde	Standaarddeviatie
$\alpha_5(1)$	0,4725	0,0779
$\alpha_4(2)$	0,8000	0,0000
$\alpha_5(2)$	0,5000	0,0006
$\alpha_5(3)$	0,5712	0,0002
$\alpha_4(4)$	0,8000	0,0000
$\alpha_5(4)$	0,5866	0,0000
$\alpha_4(5)$	0,5055	0,0151
$\alpha_5(5)$	0,5571	0,0000
t_{21}	4,0003	0,0017
t_{22}	3,9994	0,0031
t_{33}	4,0000	0,0000
t_{41}	3,9999	0,0004
t_{52}	4,0005	0,0027
t_{53}	4,0000	0,0002

6.3.3 Besluit

De twee voorgaande kalibraties tonen aan dat een bepaling van α_i parameters met behulp van een kalibratie in de praktijk niet zo zinvol zal zijn. Wanneer data over de uitstroom beschikbaar zijn en men visueel kan vaststellen waar een vraagoverschot gesitueerd is, kan de α_i verhouding, een boven- of ondergrens analytisch berekend worden. De boven- of ondergrens zou kunnen bijgesteld worden wanneer meerdere datasets beschikbaar zijn, ware het niet dat het knooppmodel veronderstelt dat de α_i parameters afhankelijk zijn van de afslagfracties. De afhankelijkheid situeert zich in de bepaling van de gewichten. Als de afslagfracties constant zouden verondersteld worden in de tijd, zou een leereffect wel tot een continue bijstelling van de boven- of ondergrens kunnen leiden.

Wanneer een intern of extern aanbod niet volledig wordt benut, kan niets bijgeleerd worden over de α_i verhouding van de betrokken ingaande schakels.

Wat betreft de t_{ik} parameters, kan besloten worden dat deze een eenduidige oplossing hebben wanneer de stromen reeds goed gekalibreerd zijn.

6.4 Kalibratie van het onderliggend model

In wat volgt, worden vier verschillende types kalibraties besproken. Eerst gaat het om een kalibratie van de α_{ij} en α_{ik} parameters waarbij voor de gewichten en de t_{ik} parameters, de theoretische waarden uit sectie 6.1.2 gebruikt worden. Vervolgens worden de parameters uit de t_{ik} matrix toegevoegd aan de te kalibreren parameters. In sectie 6.4.3 worden de gewichten gekalibreerd. Daarbij worden de theoretische waarden van de α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} parameters gebruikt. De laatste kalibratie voegt dan opnieuw de t_{ik} parameters toe aan de te kalibreren parameterset.

6.4.1 Kalibratie van α_{ij} en α_{ik}

Keuze van te kalibreren parameters en beperkingen

In deze kalibratie worden alle α_{ij} en α_{ik} parameters die in vergelijkingen 40 en 41 verschillend zijn van 0, gekalibreerd. Aangezien in het testscenario op elke ingaande schakel (behalve op ingaande schakel 1) wel eens een filevorming optreedt, is het ook nuttig om alle α_{ij} en α_{ik} parameters te kalibreren. Deze parameters blijven constant over alle tijdstappen heen. De $\alpha_{ij}(1,1)$ wordt ook gekalibreerd omdat deze door een beperking samenhangt met $\alpha_{ij}(4,1)$. De vector met te kalibreren parameters ziet eruit zoals in vergelijking 58.

$$te\ kalibreren\ parameters = \begin{bmatrix} \alpha_{ij}(1,1) \\ \alpha_{ij}(4,1) \\ \alpha_{ij}(3,2) \\ \alpha_{ij}(5,2) \\ \alpha_{ij}(2,3) \\ \alpha_{ij}(3,3) \\ \alpha_{ik}(2,1) \\ \alpha_{ik}(4,1) \\ \alpha_{ik}(2,2) \\ \alpha_{ik}(5,2) \\ \alpha_{ik}(3,3) \\ \alpha_{ik}(5,3) \end{bmatrix} \quad (58)$$

Er zijn enkele beperkingen verbonden aan deze variabelen. Eerst en vooral moet de som van de α_{ij} parameters vanuit alle ingaande schakels naar een uitgaande schakel, gelijk zijn aan 1. Een analoge voorwaarde geldt voor de α_{ik} parameters. Vergelijking 59 geeft deze beperking weer in de vorm van een matrixvergelijking. De random startwaarden zijn ook zo gekozen dat ze voldoen aan deze vergelijking. De onder- en bovengrens worden zo ingesteld dat alle parameters tussen 0 en 1 liggen.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_{ij}(1,1) \\ \alpha_{ij}(4,1) \\ \alpha_{ij}(3,2) \\ \alpha_{ij}(5,2) \\ \alpha_{ij}(2,3) \\ \alpha_{ij}(3,3) \\ \alpha_{ik}(2,1) \\ \alpha_{ik}(4,1) \\ \alpha_{ik}(2,2) \\ \alpha_{ik}(5,2) \\ \alpha_{ik}(3,3) \\ \alpha_{ik}(5,3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (59)$$

Resultaten

Naar analogie met de kalibraties uit sectie 6.3.1 en 6.3.2, worden opnieuw 200 sets van startwaarden gegenereerd. De beste 195 resultaten hebben allemaal een doelfunctiewaarde die kleiner of gelijk is aan 1. Deze 195 parametersets worden gebruikt om een gemiddelde en een standaarddeviatie van te bepalen (Tabel 3). De doelfunctiewaarden die kleiner dan 1 zijn, tonen aan dat de fit van de uitstroom exact is.

Wat de parameterwaarden betreft, is er wat spreiding te bespeuren. Wat geobserveerd kan worden, is dat de meeste variabelen schommelen rond de theoretisch gekozen waarde. Zoals in Appendix A kan nagekeken worden, zijn er in het testscenario 4 verschillende conflicten waarbij de α_i ratio exact wordt nageleefd door

de uitstroom. Dat betekent dat 4 vergelijkingen kunnen opgesteld worden waaraan de te kalibreren variabelen zich moeten houden. Daarnaast zijn in vergelijking 59 nog 6 beperkingen geformuleerd. Dat maakt het totaal aan vergelijkingen gelijk aan 10 terwijl er 12 variabelen te kalibreren zijn.

Twee parameters, namelijk $\alpha_{ij}(1,1)$ en $\alpha_{ij}(4,1)$, hebben een afwijkend gedrag. Aangezien α_1 in geen enkel conflict betrokken is, is het ook logisch dat de parameter $\alpha_{ij}(1,1)$ geen vaste waarde heeft. Hiermee is het afwijkende gedrag van $\alpha_{ij}(1,1)$ al verklaard. Door de koppeling tussen $\alpha_{ij}(4,1)$ en $\alpha_{ij}(1,1)$, heeft $\alpha_{ij}(4,1)$ ook een grotere afwijking.

Ten slotte is het ook interessant om de α_i waarden te bekijken, berekend met de resultaten van de kalibratie. In Appendix D is de α_i matrix van het testscenario gegeven (Tabel 14). Daaronder is ook voor drie parametersets de bekomen α_i matrix gegeven (Tabel 15, Tabel 16 en Tabel 17). Een vergelijking van de α_i ratio's toont aan dat deze, ongeacht de startvector, telkens op de theoretische ratio's terecht komen. De α_i parameters zelf, wijken iets meer af van de theoretische waarden maar zijn nog steeds een heel goede benadering.

Tabel 3: resultaten kalibratie α_{ij} en α_{ik} op testscenario

Parameters	Gemiddelde	Standaarddeviatie
$\alpha_{ij}(1,1)$	0,4465	0,0792
$\alpha_{ij}(4,1)$	0,5535	0,0792
$\alpha_{ij}(3,2)$	0,7642	0,0115
$\alpha_{ij}(5,2)$	0,2358	0,0115
$\alpha_{ij}(2,3)$	0,1941	0,0020
$\alpha_{ij}(3,3)$	0,8059	0,0020
$\alpha_{ik}(2,1)$	0,1430	0,0184
$\alpha_{ik}(4,1)$	0,8570	0,0184
$\alpha_{ik}(2,2)$	0,2453	0,0146
$\alpha_{ik}(5,2)$	0,7547	0,0146
$\alpha_{ik}(3,3)$	0,7733	0,0087
$\alpha_{ik}(5,3)$	0,2267	0,0087

6.4.2 Kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik}

Keuze van te kalibreren parameters en beperkingen

Deze kalibratie gebruikt de kalibratie uit 6.4.1 als basis en voegt hier 6 parameters aan toe. Dit zijn de parameters uit de t_{ik} matrix. De vector met te kalibreren variabelen is zichtbaar in vergelijking 60.

$$te\ kalibreren\ parameters = \begin{bmatrix} \alpha_{ij}(1,1) \\ \alpha_{ij}(4,1) \\ \alpha_{ij}(3,2) \\ \alpha_{ij}(5,2) \\ \alpha_{ij}(2,3) \\ \alpha_{ij}(3,3) \\ \alpha_{ik}(2,1) \\ \alpha_{ik}(4,1) \\ \alpha_{ik}(2,2) \\ \alpha_{ik}(5,2) \\ \alpha_{ik}(3,3) \\ \alpha_{ik}(5,3) \\ t_{21} \\ t_{22} \\ t_{33} \\ t_{41} \\ t_{52} \\ t_{53} \end{bmatrix} \quad (60)$$

Vergelijking 59 blijft gelden als beperking. De bijgekomen parameters hebben een ondergrens van 0 en een bovengrens van 20. De startwaardes voor deze parameters worden willekeurig gekozen tussen 0 en 10.

Resultaten

In sectie 6.2 was het al duidelijk dat deze kalibratie veel moeilijker tot een globaal minimum komt. Er zijn 52 kalibraties die een doelfunctiewaarde hebben die kleiner is dan 1. Dat betekent dat de uitstroom van de metingen gelijk is aan de uitstroom volgens het model. Deze 52 resultaten worden gebruikt voor het berekenen van een gemiddelde en een standaarddeviatie per parameter (Tabel 4).

Voor besluiten inzake de kalibratie van de α_{ij} en α_{ik} parameters, kan verwezen worden naar 6.4.1. Uit de resultaten blijkt dat bij alle kalibraties exact de theoretische waarden van de t_{ik} parameters bekomen worden. De verklaring hiervoor is dezelfde als in sectie 6.3.2, namelijk het feit dat er in de doelfunctie een term zit die de bezetting van de conflictpunten nagaat. Hierdoor komen in de doelfunctie ook de t_{ik} variabelen expliciet aan bod. De volledige redenering is te vinden in sectie 6.3.2.

Ten slotte worden ook de α_i parameters voor de eerste drie oplossingen geanalyseerd. Deze zijn te vinden in Appendix D (Tabel 18, Tabel 19 en Tabel 20). Opnieuw zijn de α_i ratio's ongeveer exact gelijk aan de theoretische ratio's. De α_i parameters wijken iets meer af maar zijn nog steeds een heel goede benadering.

Tabel 4: resultaten kalibratie α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op testscenario

Parameters	Gemiddelde	Standaarddeviatie
$\alpha_{ij}(1,1)$	0,4252	0,2539
$\alpha_{ij}(4,1)$	0,5748	0,2539
$\alpha_{ij}(3,2)$	0,7670	0,0374
$\alpha_{ij}(5,2)$	0,2330	0,0374
$\alpha_{ij}(2,3)$	0,1947	0,0060
$\alpha_{ij}(3,3)$	0,8053	0,0060
$\alpha_{ik}(2,1)$	0,1479	0,0588
$\alpha_{ik}(4,1)$	0,8521	0,0588
$\alpha_{ik}(2,2)$	0,2415	0,0469
$\alpha_{ik}(5,2)$	0,7585	0,0469
$\alpha_{ik}(3,3)$	0,7756	0,0275
$\alpha_{ik}(5,3)$	0,2244	0,0275
t_{21}	4,0011	0,0084
t_{22}	4,0000	0,0001
t_{33}	4,0000	0,0003
t_{41}	3,9996	0,0034
t_{52}	4,0000	0,0000
t_{53}	3,9996	0,0026

6.4.3 Kalibratie van w_{ij} en w_{ik}

Keuze van te kalibreren parameters en beperkingen

Bij het bepalen van de te kalibreren w_{ij} en w_{ik} parameters, moet even nagedacht worden over welke parameters variabel zijn in de tijd en welke niet. Omdat de som van alle w_{ij} en w_{ik} parameters over één ingaande link gelijk moet zijn, zal de parameter w_{i1j1} altijd gelijk zijn aan 1. Deze parameter wordt dus niet mee gekalibreerd. Ook zijn de waarden voor w_{i4j1} en w_{i4k1} over alle tijdstappen heen gelijk (omdat deze niet beïnvloed worden door de afslagfracties). Vandaar dat deze twee parameters constant worden verondersteld. Voor alle andere w_{ij} en w_{ik} parameters die verschillend zijn van 0, wordt een parameter gedefinieerd per tijdstap. Het gaat om de parameters w_{i2j3} , w_{i2k1} , w_{i2k2} , w_{i3j2} , w_{i3j3} , w_{i3k3} , w_{i5j2} , w_{i5k2} , w_{i5k3} . Dat maakt het totaal aantal te kalibreren parameters gelijk aan 47.

Bij het kalibreren moet ook rekening gehouden worden met een aantal beperkingen. Deze beperkingen zijn gebaseerd op vergelijking 31 en hieronder geformuleerd. De startwaarden worden ook zodanig gekozen dat deze aan de voorwaarden voldoen. Ten slotte worden ook een ondergrens van 0 en een bovengrens van 1 vast gelegd voor de parameters.

$$w_{i_4j_1} + w_{i_4k_1} = 1 \quad (61)$$

$$w_{i_2j_3}(t) + w_{i_2k_1}(t) + w_{i_2k_2}(t) = 1 \quad \forall t \quad (62)$$

$$w_{i_3j_2}(t) + w_{i_3j_3}(t) + w_{i_3k_3}(t) = 1 \quad \forall t \quad (63)$$

$$w_{i_5j_2}(t) + w_{i_5k_2}(t) + w_{i_5k_3}(t) = 1 \quad \forall t \quad (64)$$

Resultaten

Opnieuw werden 200 verschillende startwaarden gekozen voor de kalibratie. Van al deze kalibraties zijn er 142 die een doelfunctiewaarde hebben van ongeveer 0 en dus ook een perfecte fit opleveren van de uitstroom.

In sectie 6.1.2 werd reeds aangetoond dat de waarden voor de w_{ij} en w_{ik} parameters die horen bij α_1 tot α_4 , eigenlijk geen rol spelen. Dit komt omdat de α_{ij} en α_{ik} die horen bij ingaande schakel 1 tot 4, per ingaande schakel gelijk zijn voor alle conflicten waar voertuigen vanuit deze schakel mee te maken hebben. De wegingsfactoren w_{ij} en w_{ik} voor deze α_{ij} en α_{ik} parameters bij de bepaling van α_i , hebben dus geen belang. Het optimalisatie algoritme merkt op dat deze variabelen geen invloed hebben op de doelfunctie en stuurt deze parameters zoveel mogelijk naar het midden van het toegelaten interval. Hierbij wordt wel rekening gehouden met beperkingen 61 tot 63. Alle variabelen van vergelijking 62 en 63 komen daardoor bij het kalibreren terecht op een waarde van 0,33. De variabelen van vergelijking 61 worden gekalibreerd op 0,5.

Na voorgaande redenering, blijven nog 15 parameters over die onderzocht kunnen worden. Dit zijn de parameters w_{i5j2} , w_{i5k2} en w_{i5k3} voor alle vijf tijdstappen. De zes variabelen die horen bij tijdstap 1 en 2, zijn gekalibreerd op een waarde van ongeveer 0,33. Dit is te verklaren door het feit dat α_5 in tijdstap 1 en 2 geen belangrijke rol speelt bij het verdelen van het aanbod op een conflictpunt. Tabel 5 geeft de gemiddelde waarden en standaarddeviaties voor de 9 overblijvende variabelen. Na een vergelijking van deze gekalibreerde parameters met de theoretische waarden in Appendix B, blijkt dat deze een zeer goede benadering zijn. De parameter w_{i5k2} komt exact overeen met de theoretische waarde. Voor de andere twee parameters is dat niet het geval omdat deze dezelfde rol vervullen in het bepalen van α_5 ($\alpha_{ij}(5,2)$ en $\alpha_{ik}(5,3)$ zijn immers gelijk verondersteld).

Tabel 5: resultaten kalibratie w_{ij} en w_{ik} op testscenario

Parameters	Gemiddelde	Standaarddeviatie	Theoretische waarde
$w_{i5j2}(3)$	0,1911	0,0030	0,1337
$w_{i5k2}(3)$	0,6188	0,0000	0,6188
$w_{i5k3}(3)$	0,1901	0,0030	0,2475
$w_{i5j2}(4)$	0,1780	0,0036	0,1624
$w_{i5k2}(4)$	0,6443	0,0000	0,6443
$w_{i5k3}(4)$	0,1777	0,0036	0,1933
$w_{i5j2}(5)$	0,2019	0,0048	0,1071
$w_{i5k2}(5)$	0,5952	0,0000	0,5952
$w_{i5k3}(5)$	0,2028	0,0048	0,2976

De α_i parameterwaarden kunnen berekend worden uit de gekalibreerde w_{ij} en w_{ik} parameters en de theoretische α_{ij} en α_{ik} parameters (Appendix D: Tabel 21, Tabel 22 en Tabel 23). Zoals reeds eerder aangehaald, zijn α_1 tot α_4 gelijk aan de theoretische waarden omdat de theoretische α_{ij} en α_{ik} parameters per ingaande schakel gelijk zijn en de weging dus niets uitmaakt. Wat betreft α_5 , worden voor tijdstap 3, 4 en 5 de theoretische waarden bekomen. Dit omdat α_5 in deze tijdstappen een eenduidige waarde heeft. In tijdstappen 1 en 2 heeft α_5 een ondergrens die gerespecteerd wordt door deze waarden.

6.4.4 Kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik}

Keuze van te kalibreren parameters en beperkingen

Deze kalibratie is gebaseerd op de kalibratie in sectie 6.4.3. Net zoals in sectie 6.3.2 en 6.4.2 worden zes parameters toegevoegd aan de te kalibreren set van parameters, namelijk de bezettijden. Dat maakt het totaal aantal variabelen dat gekalibreerd wordt, gelijk aan 53. De beperkingen voor de w_{ij} en w_{ik} parameters blijven dezelfde als in de kalibratie van sectie 6.4.3. De bezettijden krijgen een ondergrens van 0 en een bovengrens van 20.

Resultaten

Van de 200 uitgevoerde kalibraties, zijn er 20 met een doelfunctiewaarde die kleiner is dan 1. Dat betekent dat opnieuw een perfecte fit van de uitstroom gerealiseerd wordt.

Wat betreft de gekalibreerde gewichten, zijn zoals in sectie 6.4.3 enkel gemiddelden en standaarddeviaties van w_{i5j2} , w_{i5k2} en w_{i5k3} voor tijdstappen 3, 4 en 5 berekend. Deze zijn te vinden in Tabel 6. Wat betreft de w_{ij} en w_{ik} parameters, kunnen dezelfde zaken geobserveerd worden als in sectie 6.4.3. De analyse van de α_i parameters is weergegeven in Appendix D (Tabel 24, Tabel 25 en Tabel 26). Ook bij deze analyse kunnen dezelfde besluiten getrokken worden als in de vorige kalibratie.

Wat betreft de t_{ik} parameters, kan dezelfde redenering gevolgd worden als in sectie 6.3.2. De doelfunctieterm die de bezetting van de conflictpunten nagaat zorgt ervoor dat de t_{ik} variabelen expliciet aan bod komen in de doelfunctie. De volledige redenering is te vinden in sectie 6.3.2.

Tabel 6: resultaten kalibratie w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op testscenario

Parameters	Gemiddelde	Standaarddeviatie	Theoretische waarden
$w_{i5j2}(3)$	0,1906	0,0001	0,1337
$w_{i5k2}(3)$	0,6188	0,0000	0,6188
$w_{i5k3}(3)$	0,1906	0,0001	0,2475
$w_{i5j2}(4)$	0,1778	0,0001	0,1624
$w_{i5k2}(4)$	0,6443	0,0000	0,6443
$w_{i5k3}(4)$	0,1778	0,0001	0,1933
$w_{i5j2}(5)$	0,2024	0,0001	0,1071
$w_{i5k2}(5)$	0,5952	0,0000	0,5952
$w_{i5k3}(5)$	0,2024	0,0001	0,2976
t_{21}	3,9939	0,0202	4,0000
t_{22}	4,0001	0,0004	4,0000
t_{33}	4,0000	0,0000	4,0000
t_{41}	4,0015	0,0050	4,0000
t_{52}	4,0000	0,0001	4,0000
t_{53}	4,0000	0,0000	4,0000

6.4.5 Besluit

In deze sectie werden de kalibraties van het onderliggende niveau besproken. Het is duidelijk dat, wanneer de t_{ik} parameters mee gekalibreerd worden, het optimalisatie algoritme makkelijker blijft steken in een lokaal optimum. Toch kan met elk van de kalibraties een perfecte fit van de uitstroom bereikt worden.

Wat betreft de kalibratie van de α_{ij} en α_{ik} parameters, kan besloten worden dat deze redelijk goed benaderd worden door de kalibratie. Wanneer er afslagfracties meespelen die variëren doorheen de tijd, kunnen de parameters eenduidiger bepaald worden want dan zijn er meer vergelijkingen waaraan deze moeten voldoen. De α_i parameters en de gewichten variëren dan immers ook doorheen de tijd.

Wat betreft de kalibratie van de gewichten, kan besloten worden dat het aantal te kalibreren parameters sterk afhangt van het al dan niet variëren van de afslagfracties doorheen de tijd. Als deze variëren, dan moeten alle gewichten per tijdstap apart gedefinieerd worden. Hierdoor stijgt het aantal parameters heel sterk. De gewichten die in dit onderdeel gekalibreerd zijn en bijdragen tot een α_i ratio die exact overeenkomt met de uitstroom, komen heel dicht in de buurt van de theoretische gewichten.

De twee voorgaande paragrafen maken duidelijk dat de aanwezigheid van variërende afslagfracties duidelijk een verschillend effect heeft op beide soorten kalibraties. Aangezien het aantal parameters bij de kalibratie van α_{ij} en α_{ik} minder sterk beïnvloed is door variërende afslagfracties, kan een voorkeur uitgaan naar dit soort kalibratie.

Wat betreft de kalibratie van de gewichten, dient nog een opmerking gemaakt te worden. Wanneer verondersteld wordt dat alle α_{ij} en α_{ik} parameters vanuit een ingaande schakel gelijk zijn, dan is het niet zinvol om deze parameters of bijhorende gewichten te kalibreren. De waarde van de gewichten heeft dan namelijk geen invloed op de α_i parameter en de α_{ij} en α_{ik} parameters zullen gelijk zijn aan de α_i parameter van deze ingaande schakel.

Per kalibratie is ten slotte ook een analyse gemaakt van de resulterende α_i parameters. Hier komt een duidelijk verschil tussen de kalibratie van de α_{ij} en α_{ik} parameters en de kalibratie van de gewichten naar boven. Doordat de α_{ij} en α_{ik} parameters constant zijn over alle tijdstappen heen, worden de α_i parameters in tijdstappen waarbij de α_i ratio niet kan gekalibreerd worden, toch heel nauwkeurig benaderd. Bij de kalibratie van de gewichten is dit niet zo, aangezien deze per tijdstap gedefinieerd zijn. Naast deze observatie, valt het ook op dat op de bekomen α_i parameters iets meer speling zit dan op de ratio's.

6.5 Besluit

In dit hoofdstuk werden zes kalibraties uitgevoerd op een testscenario. In sectie 6.1 is toegelicht hoe dit testscenario werd opgesteld. Vervolgens werd in sectie 6.2 onderzocht welk van de vier eerder geformuleerde doelfuncties voor de beste resultaten zorgt. Dit blijkt een combinatie te zijn van het gewogen stroomverschil tussen werkelijke en gekalibreerde stromen en het verschil in bezetting van de interne conflictpunten. In secties 6.3 en 6.4 zijn de kalibraties uitgewerkt van het bovenliggende respectievelijk onderliggende niveau.

Wat betreft de uitgewerkte kalibraties kan allereerst een uitspraak gedaan worden over het verschil tussen de kalibraties die de t_{ik} parameters niet mee kalibreren en de kalibraties die dit wel doen. Reeds in sectie 6.2 was het duidelijk dat het mee kalibreren van de t_{ik} parameters ervoor zorgt dat het optimalisatie algoritme makkelijker in een lokaal optimum terecht komt. Toch kan met elke besproken kalibratie een perfecte fit van de uitstroom bereikt worden wanneer de set van startwaarden voldoende groot is. Door de perfecte fit van de uitstroom en de bezettijden, zijn ook de juiste beperkingen geactiveerd.

Bij de kalibratie van de α_i parameters is aan het licht gekomen dat het gebruik hiervan in de praktijk niet echt zinvol zal zijn. Het is namelijk mogelijk om, indien er een vraagoverschot is op één van de ingaande schakels, een boven- of ondergrens te bepalen voor de α_i ratio van dat bepaalde conflictpunt. Als er op alle ingaande schakels, die stroom sturen naar een bepaald conflictpunt, een vraagoverschot is, kan de α_i ratio zelfs eenduidig berekend worden.

Wat betreft het onderliggende niveau kan besloten worden dat zowel de kalibratie van de α_{ij} en α_{ik} parameters als de kalibratie van de gewichten leidt tot een goede overeenkomst tussen theoretische en gekalibreerde parameters. Wel dient opgemerkt te worden dat het aantal te kalibreren gewichten heel sterk afhangt van de aanwezigheid van tijdsafhankelijke afslagfracties. In die zin zou de voorkeur dan toch kunnen uitgaan naar een kalibratie van de α_{ij} en α_{ik} parameters.

Merk ten slotte op dat in de onderliggende kalibratie een goede fit voorkomt van de theoretische en gekalibreerde parameters omdat in het testscenario ook heel wat verschillende regimes voorkomen. Om meer parameters beter te kunnen kalibreren, moeten dus data voor handen zijn waarbij een variëteit aan regimes actief is.

Hoofdstuk 7: Kalibratie van bestudeerde kruispunt

In dit hoofdstuk worden de voorgestelde kalibratiemethodes toegepast op de metingen. In sectie 7.1 wordt uitgelegd hoe de data opgedeeld worden in discrete tijdstappen. Daarnaast wordt per tijdstap ook aangegeven welke conflicten zullen domineren. In sectie 7.2 wordt aangegeven welke waarden gekozen worden voor de vaste parameters in de kalibraties. De kalibratie van het bovenliggende niveau wordt besproken in sectie 7.3. Het onderliggende niveau komt aan bod in sectie 7.4. Het besluit in sectie 7.5 vat de bevindingen van dit hoofdstuk samen.

7.1 Selectie van data voor analyse³

In dit onderdeel worden de eigenschappen van de bestudeerde tijdstappen besproken. Gedurende een drietal uur (van 15u tot 18u) werd de avondspits opgenomen met behulp van camerabeelden. Het tijdsegment uit de avondspits dat gebruikt wordt bij het kalibreren, duurt 50 minuten en loopt van 17 uur tot 17:50 uur. De reden waarom niet meer data gebruikt zijn van deze avondspits is omdat buiten het verkozen tijdsblok nergens structurele file aanwezig is. Het tijdsegment wordt opgedeeld in tijdstappen van 5 minuten. Dat brengt het totaal aantal tijdstappen op 10. Tabel 7 geeft een overzicht van de geldende vraag- en aanbodbeperkingen per tijdstap. De laatste twee kolommen van deze tabel geven aan wanneer het interne conflictpunt 3 en de aanbodbeperking op uitgaande schakel 2 geactiveerd worden.

³ De tellingen en bijhorende verwerking zijn te vinden in de elektronische bijlagen.

Tabel 7: overzicht vraagoverschot en aanbodbeperking metingen

		Vraagoverschot	Beperkt aanbod	Activatie intern conflict 3	Activatie extern conflict 2
t_1	17:00-17:05				
t_2	17:05-17:10	S_5		X	
t_3	17:10-17:15	S_5		X	
t_4	17:15-17:20	S_5	$R_2(996 \text{ vtg/u})$		X
t_5	17:20-17:25	S_5	$R_2(936 \text{ vtg/u})$		X
t_6	17:25-17:30	S_5		X	
t_7	17:30-17:35				
t_8	17:35-17:40	S_5		X	
t_9	17:40-17:45	S_5		X	
t_{10}	17:45-17:50				

Van 17:05 tot 17:30 en van 17:35 tot 17:45 is er structurele file op ingaande schakel 5. Dat betekent dat het interne conflictpunt 3 geactiveerd wordt in deze tijdstappen. Merk op dat de conflictpunten besproken worden in sectie 4.2. Op Figuur 5 van sectie 4.2 zijn deze dan ook aangeduid. Van 17:15 tot 17:25 komt daarbovenop ook een fileterugslag op uitgaande schakel 2, waardoor het aanbod op deze schakel beperkt is. Deze aanbodbeperking domineert de activatie van intern conflictpunt 3, waardoor deze niet meer geldig is.

Een van de doelen van deze masterproef was het uitvoeren van een validatie met behulp van het best bevonden kalibratiemodel en de meest passende set van parameters. Gezien de beperkte hoeveelheid data, zal een validatie in deze masterproef niet worden uitgevoerd. Als de data immers in twee delen verdeeld zouden worden, zouden deze wellicht zo gelijkaardig en beperkt zijn dat een validatie niet veel zou bijbrengen. Idealiter zou voor de validatie gebruik gemaakt worden van data die verkregen werden op de piekperiode van een andere dag.

7.2 Keuze van vaste parameterwaarden

Wat betreft de waarden voor de capaciteit, werd in sectie 5.1 reeds aangegeven dat bij het kalibreren op basis van de metingen een waarde van 1800 vtg/u zou gebruikt worden. Dit is de capaciteit per in- of uitgaande rijstrook.

In de kalibraties waar de t_{ik} parameters niet mee gekalibreerd worden, zijn deze berekend met de formule uit vergelijking 19 van sectie 3.1.2. Voor t_{53} en t_{33} geven vergelijkingen 65 en 66 aan hoe deze berekend worden. Een bemerking moet hier gemaakt worden. De parameter t_{33} is slechts half zo groot als t_{53} . Dit omdat twee rijstroken vanuit ingaande schakel 3 het conflictpunt 3 beslaan. Het model veronderstelt dus dat twee voertuigen tegelijk gebruik kunnen maken van dit conflictpunt. In combinatie met de modelaannname dat de vraag aan het begin van de

tijdstap staat te wachten op de ingaande schakel en niet gespreid is in de tijd, kan dit zorgen voor een overschatting van de stromen die het conflictpunt kunnen overbruggen.

$$t_{53} = \frac{3600}{C^{L,ik}} = \frac{3600}{1800} = 2 \quad (65)$$

$$t_{33} = \frac{3600}{C^{L,ik}} = \frac{3600}{2.1800} = 1 \quad (66)$$

Bij het kalibreren van de α_{ij} en α_{ik} parameters moeten waarden gekozen worden voor de w_{ij} en w_{ik} parameters. Hiervoor worden vergelijkingen 32 tot 35 uit sectie 3.3 gebruikt. Appendix C bevat deze theoretische w_{ij} en w_{ik} parameters.

Wanneer de w_{ij} en w_{ik} parameters gekalibreerd worden, moeten waarden gekozen worden voor de α_{ij} en α_{ik} parameters. Hiervoor worden de waarden uit vergelijking 40 en 41 gebruikt. Dat zijn dezelfde waarden als bij het testscenario. Er wordt geen gebruik gemaakt van extreme waarden omdat de niet-geprioriteerde stromen op dit kruispunt regelmatig toch hun voorrang opeisen.

7.3 Kalibratie van bovenliggend model

Uit de kalibraties, besproken in sectie 6.3, blijkt dat een kalibratie van α_i parameters in de praktijk niet erg zinvol is. Toch wordt deze kalibratie in dit onderzoek ook toegepast op de metingen omdat op die manier nog andere inzichten kunnen verworven worden. In sectie 7.3.1 worden enkel de α_i parameters gekalibreerd. In sectie 7.3.2 worden ook de t_{ik} parameters gekalibreerd.

7.3.1 Kalibratie van α_i

Keuze van te kalibreren parameters en beperkingen

In deze sectie wordt een kalibratie uitgevoerd van de α_i variabelen om de modelresultaten in overeenstemming te brengen met de geobserveerde data. In tijdstap 1, 7 en 10 kan de vraag vanuit iedere ingaande schakel onbeperkt het kruispunt oversteken. Dat betekent dat er dus geen conflicten geactiveerd worden. Een kalibratie van α_i parameters voor deze tijdsegmenten zou dan ook niets opleveren. In alle andere tijdstappen worden wel beperkingen geactiveerd. De parameters α_3 en α_5 spelen een rol in de strijd om het aanbod op conflictpunt 3 of in uitgaande schakel 2. Aangezien het de verhouding van de α_i parameters is die de stromen bepaalt, kan aan een van beide α_i parameters een vaste waarde toegewezen worden. Vandaar dat α_3 een waarde van 0,8 krijgt. Vergelijking 67 toont de matrix met

de α_i parameterwaarden per tijdstap. De onbekenden zullen gekalibreerd worden. De keuze voor de vaste waarden is willekeurig en beïnvloedt de kalibratie niet.⁴

Wat betreft de beperkingen op de parameterwaarden, geldt enkel dat de α_i parameters tussen 0 en 1 moeten liggen.

$$\alpha_i(t) = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & \alpha_5(2) \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & \alpha_5(3) \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & \alpha_5(4) \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & \alpha_5(5) \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & \alpha_5(6) \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & \alpha_5(8) \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & \alpha_5(9) \\ 0,2 & 0,2 & 0,8 & 0,8 & 0,2 \end{bmatrix} \quad (67)$$

Resultaten

Na het uitvoeren van 200 kalibraties met verschillende startwaarden, worden de beste resultaten weerhouden. Aangezien alle kalibraties een doelfunctiewaarde bereiken van 884, worden deze ook allemaal gebruikt bij het bepalen van het gemiddelde en de standaarddeviatie per parameter (Tabel 8). Het feit dat alle kalibraties op dezelfde doelfunctiewaarde uitkomen, wijst op het feit dat dit probleem convex is.

De doelfunctie neemt duidelijk een substantiële waarde aan, die voor elke kalibratie gelijk is. Figuur 9 en Figuur 10 visualiseren per tijdstap het verloop van de uitstroom volgens de metingen en de uitstroom die resulteert uit de gekalibreerde parameters. Wat opvalt, is dat een grote afwijking optreedt in tijdstappen 2, 3, 6, 8 en 9. De vraag is waarom het kalibratiemodel er niet in slaagt om dit verschil weg te werken. De reden ligt in de keuze van de t_{ik} parameters. Voor deze kalibratie zijn deze immers berekend volgens de theoretische formule in vergelijking 19. Wanneer de bezetting berekend wordt door het aantal voertuigen dat conflictpunt 3 doorkruist te vermenigvuldigen met de theoretische bezettijd per voertuig (vergelijking 65 en 66), blijkt dat het conflictpunt met moeite voor de helft benut wordt. Dit terwijl het in werkelijkheid actief beperkend is. Een zware onderschatting van de bezettijden is dus de oorzaak van deze slechte fit.

De reden voor deze onderschatting ligt in het feit dat het model geen gebruik maakt van 'gap acceptance theory'. Met de situatie waarbij een conflictpunt onbenut blijft

⁴ Bij het kalibreren van een α_i ratio, kan één van beide parameters vast gezet worden, terwijl de andere gekalibreerd wordt. Bij deze werkwijze moet de α_i parameter waarvan men vermoedt dat deze de grootste zal zijn, vast gezet worden. Als men de kleinste parameter vast veronderstelt, heeft de ratio immers niet meer alle mogelijkheden.

omdat een minder geprioriteerd voertuig wacht op een meer geprioriteerd voertuig dat in aantocht is, wordt niet voldoende rekening gehouden. De theoretische waarde voor t_{ik} blijkt dus te laag te zijn, althans zeker wanneer de hoofdstroom geen file ondervindt.

Met deze kalibratie, waarbij de t_{ik} waarden theoretisch vastliggen is het dus onmogelijk om een goede fit te realiseren.

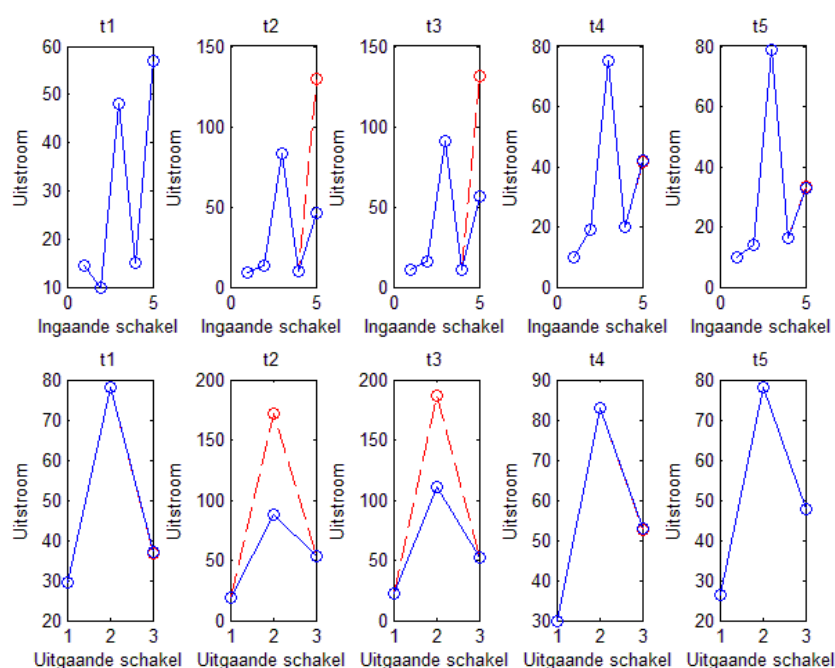
Voor tijdstap 1, 4, 5, 7 en 10 is er een perfecte fit tussen de uitstroom volgens de metingen en volgens het model. In tijdstap 1, 7 en 10 is die perfecte fit er omdat geen beperkingen geldig zijn. Dus bij gelijk welke parameterkeuze zal de volledige vraag het kruispunt op kunnen. De reden waarom er een perfecte fit is in tijdstap 4 en 5 is omdat de t_{ik} parameters hier geen rol spelen. De strengste beperking die hier optreedt, is immers de aanbodbeperking op uitgaande schakel 2.

Wat betreft de parameterwaarden, is er geen kalibratie nodig om onder- of bovengrenzen te bepalen. Dit kan immers met de methode uit sectie 6.3.1. Wanneer voor α_3 een waarde van 0,8 verondersteld wordt, zijn de bovengrenzen voor de verschillende tijdstappen gegeven in Tabel 8. Uit de gekalibreerde parameterwaarden, blijkt dat deze niet allemaal voldoen aan de berekende grenzen. Dit komt door het feit dat de t_{ik} parameters niet correct zijn ingeschat door de theoretische formules. Daardoor is het patroon van de uitstroom volledig scheefgetrokken. Logischerwijze zullen de α_i parameters dan ook niet in het verwachte interval liggen.

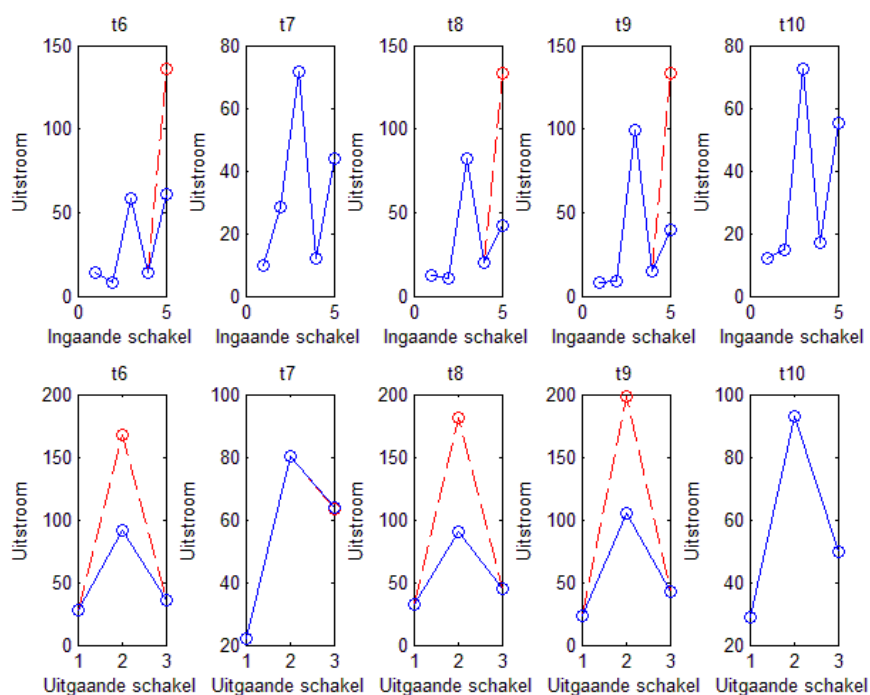
Merk ten slotte op dat de gekalibreerde stromen over het kruispunt leiden tot de activatie van dezelfde conflicten als diegene die in realiteit geldig zijn. Dit kan geverifieerd worden door de bezettijd van het interne conflict te berekenen met de gekalibreerde waarden. Wat betreft het aanbod op uitgaande schakel 2, wordt dit door de gekalibreerde stromen ook volledig opgebruikt. De activatie van deze externe beperking in tijdstap 4 en 5 blijft dus ook behouden door de kalibratie. Merk wel op dat in een DNL model, de fileterugslag op uitgaande schakel 2 langer zou kunnen duren dan de werkelijke 10 minuten. Dit door de overschatting van de uitstroom van ingaande schakel 5.

Tabel 8: resultaten kalibratie α_i op metingen

Parameters	Gemiddelde	Standaarddeviatie	Bovengrens α_5
$\alpha_5(2)$	0,4989	0,1282	0,4470
$\alpha_5(3)$	0,4907	0,1106	0,4960
$\alpha_5(4)$	0,3165	0,1431	0,4480
$\alpha_5(5)$	0,3069	0,0706	0,3350
$\alpha_5(6)$	0,4935	0,1114	0,8360
$\alpha_5(8)$	0,5056	0,1174	0,4140
$\alpha_5(9)$	0,5016	0,1345	0,3230



Figuur 9: uitstroom in- en uitgaande schakels voor tijdstap 1 tot 5 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)



Figuur 10: uitstroom in- en uitgaande schakels voor tijdstap 6 tot 10 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)

7.3.2 Kalibratie van α_i en t_{ik}

Keuze van te kalibreren parameters en beperkingen

Deze kalibratie gebruikt de kalibratie uit 7.3.1 als startpunt en voegt de zes parameters uit de t_{ik} matrix toe aan de te kalibreren parameters. Voor bezettijden wordt een ondergrens van 0 seconden en een bovengrens van 20 seconden vastgelegd.

Resultaten

Het gemiddelde en de standaarddeviatie van de 16 beste resultaten van de 200 kalibraties zijn gegeven in Tabel 9. De minimale doelfunctiewaarde van ongeveer 94 is heel wat lager dan die van de kalibratie uit sectie 7.3.1. In Figuur 11 en Figuur 12 is de uitstroom weergegeven per tijdstap en per ingaande en uitgaande schakel. Deze figuren komen voort uit de kalibratie met de beste doelfunctiewaarde. Door het meekalibreren van de t_{ik} parameters, is de fit een stuk beter dan bij de kalibratie uit sectie 7.3.1. De fout op de uitstroom van ingaande schakel 5 is hiermee ongeveer 80% gedaald. De reden waarom de fit niet perfect is, ligt deels in het feit dat de t_{ik} parameters constant verondersteld worden over de tijdstappen heen. Verkeersdrukte heeft echter een grote invloed op deze parameters.

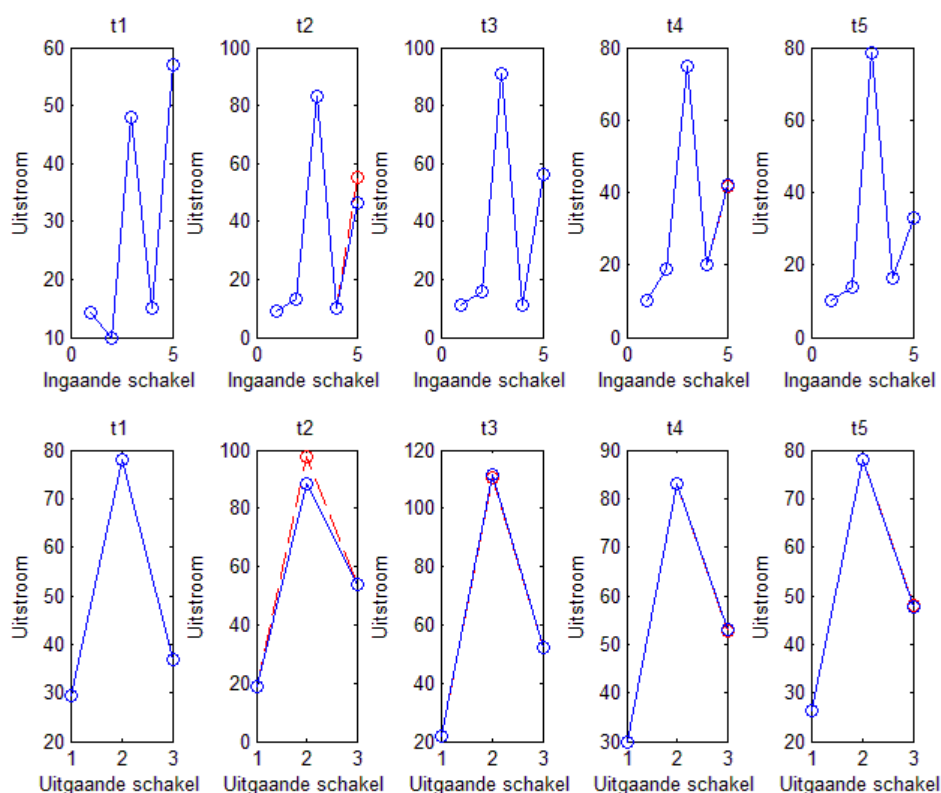
Wat onmiddellijk opvalt aan de bezettijden, is dat twee parameters, namelijk t_{33} en t_{53} , een opvallend smaller gebied bestrijken dan de andere parameters. Dit is logisch te verklaren. De andere parameters spelen een rol op conflictpunten die bij deze metingen niet actief zijn. Vandaar dat deze een relatief grote speelruimte hebben. Parameters t_{33} en t_{53} daarentegen, zijn onderhevig aan een aantal beperkingen. Aangezien het aanbod van conflictpunt 3 in tijdstappen 2, 3, 6, 8 en 9 volledig wordt opgebruikt, moet de bezettijd van de voertuigstromen vanuit ingaande schakels 3 en 5 (vergelijking 37 van sectie 5.2.3) gelijk zijn aan het aanbod op dit punt. Op die manier zijn er 5 vergelijkingen en twee onbekenden, namelijk t_{33} en t_{53} . Dit verklaart waarom deze parameters een veel smaller gebied bestrijken, ze zijn namelijk wel eenduidig bepaald. De gemiddelde waarden voor t_{33} (2,37) en t_{53} (3,86) zijn best aannemelijk. Het is logisch zijn dat t_{53} groter is dan t_{33} omdat dit een links afslaan beweging is en deze ook vaak vanuit stilstand wordt gemaakt.

Wat betreft de α_i parameters, wordt opnieuw nagegaan of de α_i ratio's binnen het interval liggen dat kon opgesteld worden met behulp van de gekende uitstroom. De gemiddelde waardes liggen ook binnen dit interval. Wanneer de standaarddeviatie in rekening wordt gebracht, worden de grenzen van de intervallen wel wat overschreden. Dit is logisch, aangezien de gekalibreerde uitstroom niet helemaal gelijk is aan de werkelijke uitstroom.

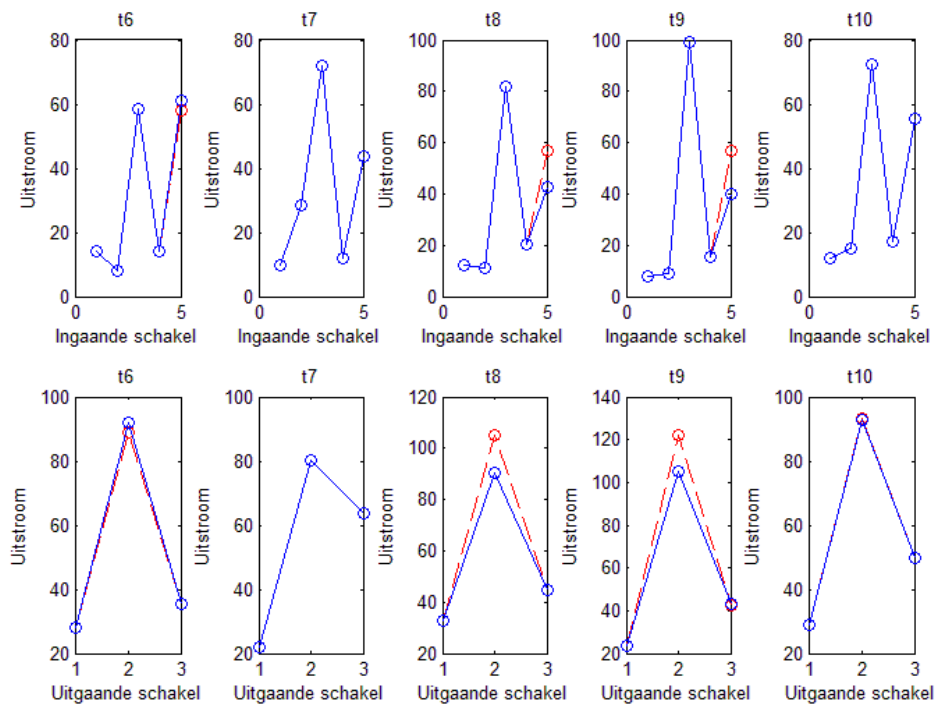
Merk op dat ook hier de activatie van de interne en externe beperkingen dezelfde is als in realiteit. Hoe dit aangetoond wordt, is besproken in sectie 7.3.1.

Tabel 9: resultaten kalibratie van α_i en t_{ik} op metingen

Parameters	Gemiddelde	Standaarddeviatie	Bovengrens α_5
$\alpha_5(2)$	0,3767	0,1111	0,4470
$\alpha_5(3)$	0,2921	0,1447	0,4960
$\alpha_5(4)$	0,2230	0,1461	0,4480
$\alpha_5(5)$	0,2206	0,1137	0,3350
$\alpha_5(6)$	0,5579	0,1975	0,8360
$\alpha_5(8)$	0,3614	0,1728	0,4140
$\alpha_5(9)$	0,2406	0,1443	0,3230
t_{21}	2,0105	1,0474	1,0000
t_{22}	2,0222	1,0291	1,0000
t_{33}	2,3686	0,1011	1,0000
t_{41}	2,0483	1,0701	2,0000
t_{52}	1,9367	1,3100	2,0000
t_{53}	3,8588	0,0623	2,0000



Figuur 11: Uitstroom in- en uitgaande schakels voor tijdstap 1 tot 5 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)



Figuur 12: Uitstroom in- en uitgaande schakels voor tijdstap 6 tot 10 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)

7.3.3 Besluit

Uit deze kalibraties blijkt het belang van een correcte schatting van de t_{ik} parameters. Het is duidelijk dat de theoretische formule niet voldoet in deze concrete verkeerssituatie. Betere resultaten met de theoretische formule zouden wellicht wel verkregen worden mocht er bijvoorbeeld ook een vraagoverschot staan op ingaande schakel 3. Dan zou het 'gap acceptance' fenomeen niet aan bod komen en zouden de t_{ik} parameters ook in realiteit meer constant zijn over de tijdstappen heen.

Wat de α_i parameters betreft, kunnen onder- en bovengrenzen bepaald worden zoals in sectie 6.3.1. De gekalibreerde parameters zullen echter niet gegarandeerd binnen deze grenzen vallen wanneer de gekalibreerde stromen geen perfecte fit geven.

7.4 Kalibratie van onderliggend model

Op het onderliggende niveau worden vier verschillende types kalibraties uitgevoerd. In sectie 7.4.1 worden de α_{ij} en α_{ik} parameters gekalibreerd. In sectie 7.4.2 worden hier de t_{ik} parameters aan toegevoegd. Sectie 7.4.3 gooit het over een andere boeg door de w_{ij} en w_{ik} parameters te kalibreren. Hierbij worden de α_{ij} en α_{ik} parameters dan vast verondersteld. De kalibratie in sectie 7.4.4 baseert zich op kalibratie 7.4.3 en voegt hier de t_{ik} parameters aan toe. In sectie 7.4.5 formuleert het besluit de belangrijkste inzichten van deze kalibraties.

7.4.1 Kalibratie van α_{ij} en α_{ik}

Keuze van te kalibreren parameters en beperkingen

In deze kalibratie worden alle α_{ij} en α_{ik} parameters gekalibreerd. Vergelijking 58 en 59 uit sectie 6.4.1 gelden ook bij deze kalibratie.

Resultaten

Alle 200 uitgevoerde kalibraties hebben een doelfunctiewaarde van 795. Dit resultaat wijst opnieuw op een convex probleem. De hoge doelfunctiewaarde heeft opnieuw te maken met het feit dat de t_{ik} parameters op de theoretische waarde gehouden worden. Figuur 13 en Figuur 14 horen bij het resultaat van startvector 1 en tonen aan dat de onderschatting van de t_{ik} parameters hier opnieuw voor een overschatting van de gekalibreerde stromen zorgt. Dit stromingspatroon is voor alle 200 kalibraties hetzelfde. Een validatie met een van deze gekalibreerde parametersets zou niet nuttig zijn, aangezien de kalibratie een heel slechte fit geeft met de realiteit.

Voor het verder bestuderen van de resultaten, moet een bedenking gemaakt worden. Aangezien de α_i waarden voor ingaande schakel 1, 2 en 4 eigenlijk niet aan bod komen bij de strijd om een intern of extern aanbod, zullen ook alle α_{ij} en α_{ik} parameters vanuit deze schakels willekeurige waarden aannemen, aangezien ze op geen enkele manier de doelfunctiewaarde kunnen reduceren.

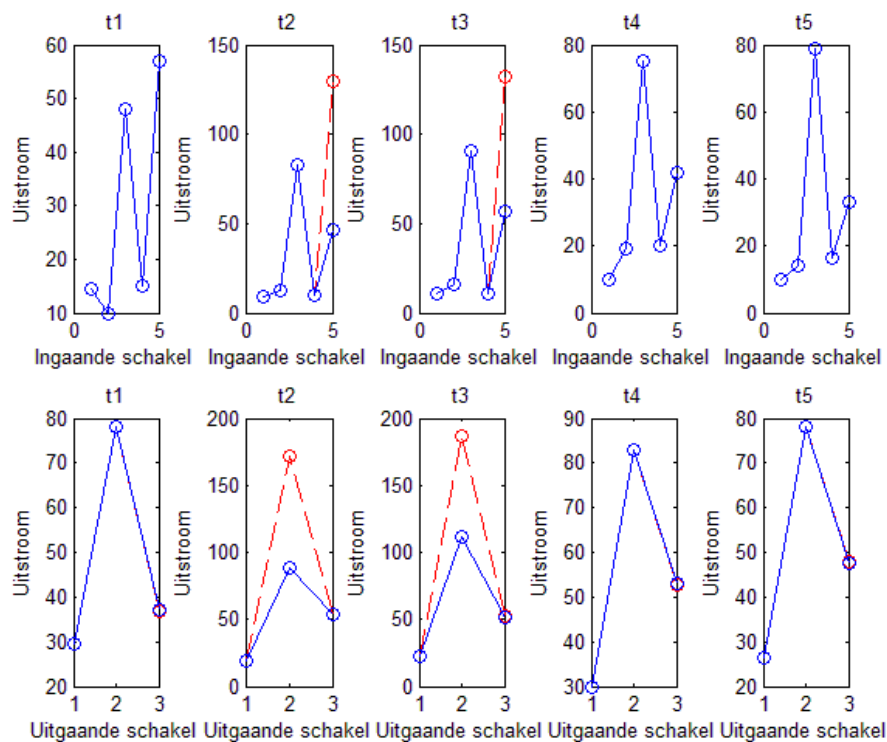
De parameters die dan nog overblijven, zijn $\alpha_{ij}(3,2)$, $\alpha_{ij}(5,2)$, $\alpha_{ij}(3,3)$, $\alpha_{ik}(5,2)$, $\alpha_{ik}(3,3)$ en $\alpha_{ik}(5,3)$. De gemiddelden en standaarddeviaties van deze parameters zijn te vinden in Tabel 10. Er zijn zeven tijdstappen (tijdstap 2, 3, 4, 5, 6, 8 en 9) waarbij er geconcurrereerd wordt om een intern/extern aanbod. Dat betekent dat zeven lineaire combinaties van parameters $\alpha_{ij}(5,2)$, $\alpha_{ik}(5,2)$ en $\alpha_{ik}(5,3)$ (respectievelijk $\alpha_{ij}(3,2)$, $\alpha_{ij}(3,3)$ en $\alpha_{ik}(3,3)$) met de gewichten moeten leiden tot een α_5 (respectievelijk α_3) die bijdraagt tot een α_i ratio die binnen een bepaald interval ligt. Door het feit dat de verhouding van α_3 en α_5 in deze situatie geen vaste waarde heeft, wordt een eenduidige oplossing niet verwacht. Toch zijn de α_{ij} en α_{ik} parameters die volgens de voorrangsregels een hogere waarde zouden hebben, eerder hoog gesitueerd in het $[0,1]$ interval. Hetzelfde principe geldt voor de lager gelegen parameters.

Met de gekalibreerde α_{ij} en α_{ik} parameters en de theoretische gewichten, worden in Appendix E (Tabel 27, Tabel 28 en Tabel 29) ter controle de α_i variabelen uitgerekend. De verhouding van α_5 en α_3 ligt niet altijd binnen de grenzen die kunnen berekend worden op basis van de uitstroom. Dat is logisch verklaarbaar door het feit dat de gekalibreerde stromen ook heel sterk afwijken van de metingen.

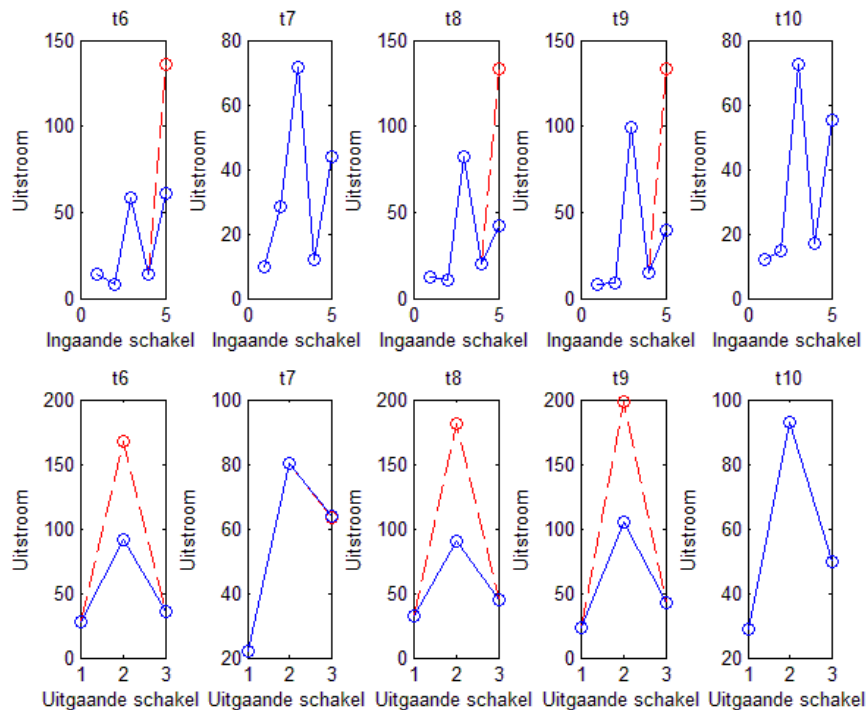
Merk op dat ook hier de activatie van de interne en externe beperkingen dezelfde is als in realiteit. Hoe dit aangetoond wordt, is besproken in sectie 7.3.1.

Tabel 10: resultaten kalibratie α_{ij} en α_{ik} op metingen

Parameters	Gemiddelde	Standaarddeviatie
$\alpha_{ij}(3,2)$	0,6555	0,0884
$\alpha_{ij}(5,2)$	0,3445	0,0884
$\alpha_{ij}(3,3)$	0,6591	0,1041
$\alpha_{ik}(5,2)$	0,2737	0,0544
$\alpha_{ik}(3,3)$	0,7291	0,0377
$\alpha_{ik}(5,3)$	0,2709	0,0377



Figuur 13: uitstroom in- en uitgaande schakels voor tijdstap 1 tot 5 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)



Figuur 14: uitstroom in- en uitgaande schakel voor tijdstap 6 tot 10 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)

7.4.2 Kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik}

Keuze van te kalibreren parameters en beperkingen

Deze kalibratie baseert zich op de kalibratie uit sectie 7.4.1 en voegt de parameters uit de t_{ik} matrix toe aan de te kalibreren parameters. Voor de t_{ik} parameters wordt een ondergrens van 0 en een bovengrens van 20 seconden ingesteld.

Resultaten

Van de 200 uitgevoerde kalibraties is de laagste behaalde doelfunctiewaarde gelijk aan 94. De 3 parametersets die een doelfunctiewaarde hebben kleiner dan 95 worden gebruikt in de berekening van het gemiddelde en de standaarddeviatie (Tabel 11). Merk op dat hier slechts rekening gehouden wordt met 3 sets van parameters terwijl dat er in sectie 7.4.1 200 zijn.

Door het feit dat de t_{ik} parameters mee gekalibreerd worden, is de doelfunctiewaarde heel wat lager dan in de voorgaande kalibratie. De fit van de uitstroom is ook een stuk beter (Figuur 15 en Figuur 16). De fout op de uitstroom reduceert – net zoals in sectie 7.3 - tot 80% wanneer de t_{ik} parameters gekalibreerd worden.

In sectie 7.4.1 werd uitgelegd waarom enkel de parameters $\alpha_{ij}(3,2)$, $\alpha_{ij}(5,2)$, $\alpha_{ij}(3,3)$, $\alpha_{ik}(5,2)$, $\alpha_{ik}(3,3)$ en $\alpha_{ik}(5,3)$ nuttig zijn voor verdere analyse wat betreft α_{ij} en α_{ik} parameters. Er is nogal wat spreiding aanwezig bij de drie parametersets die ongeveer

dezelfde doelfunctiewaarde opleveren. Dit is logisch, aangezien de α_i ratio nergens eenduidig bepaald is. Er is meer spreiding op de parameters dan bij voorgaande kalibratie. Een reden hiervoor kan de toename in te kalibreren variabelen zijn. Toch komen de hoger gelegen parameters wel overeen met de parameters die ook voorrang hebben. Een analoge redenering geldt voor de lager gelegen parameters. Dit met uitzondering van de parameters $\alpha_{ij}(3,3)$ en $\alpha_{ik}(5,2)$. Dit zijn dan ook parameters die niet rechtstreeks betrokken zijn op de beperkende conflictpunten maar wel gebruikt worden bij de berekening van α_3 en α_5 .

Wat betreft de t_{ik} parameters, valt het op dat t_{33} en t_{53} een heel kleine standaarddeviatie hebben. Zoals reeds beredeneerd in sectie 7.3.2 zijn deze dan ook eenduidig bepaald. De parameterwaarden voor deze bezettijden zijn heel aannemelijk en liggen ook heel dicht bij diegene die in sectie 7.3.2 gekalibreerd werden.

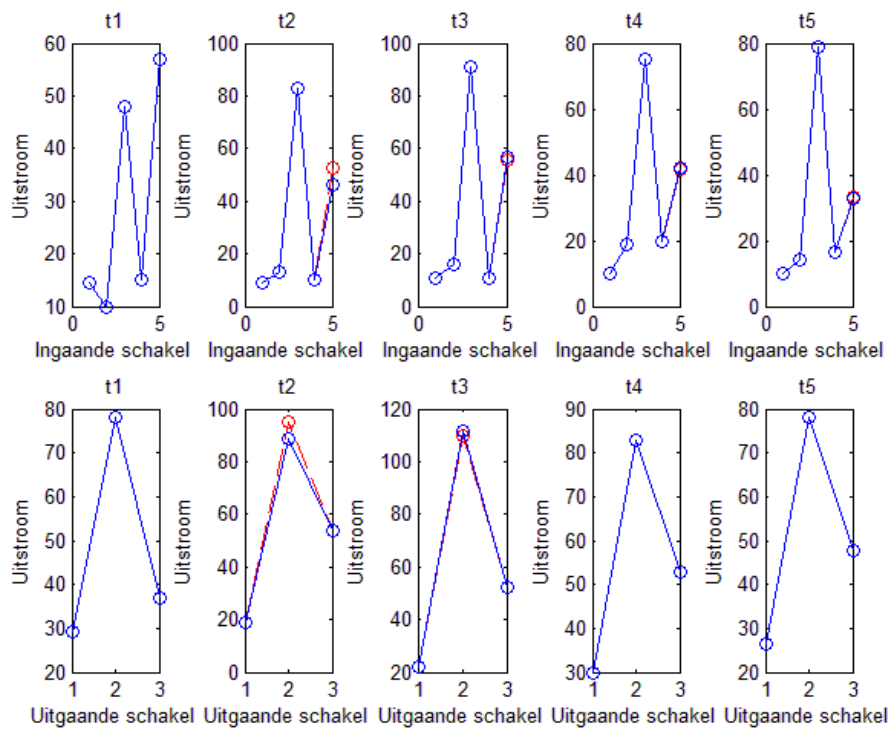
Aangezien deze kalibratie een goede fit oplevert van de uitstroom, zouden de resulterende parameters wel gebruikt kunnen worden voor een validatie. De verwachting is echter dat, als het verkeerspatroon waarmee gevalideerd wordt iets anders is dan hetgeen waarmee gekalibreerd is, de fit wel eens zou kunnen tegenvallen. Dit omdat de werkelijke verhouding van α_3 en α_5 in de dataset voor kalibratie niet aan bod komt.

Met de gekalibreerde α_{ij} en α_{ik} parameters en de theoretische gewichten, worden ter controle de α_i variabelen uitgerekend. De analyse is te vinden in Appendix E (Tabel 30, Tabel 31 en Tabel 32). De verhouding van α_3 en α_5 ligt telkens binnen de grenzen die kunnen berekend worden op basis van de uitstroom. Wat betreft de α_i parameters, is er niet echt een trend te bespeuren.

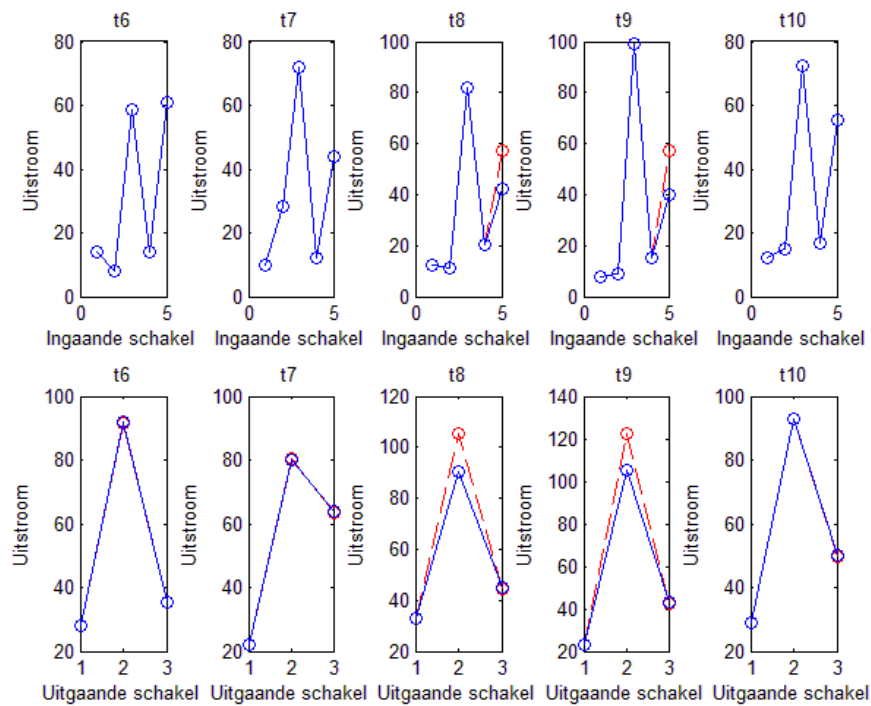
Merk op dat ook hier de activatie van de interne en externe beperkingen dezelfde is als in realiteit. Hoe dit aangetoond wordt, is besproken in sectie 7.3.1.

Tabel 11: resultaat kalibratie α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op metingen

Parameters	Gemiddelde	Standaarddeviatie
$\alpha_{ij}(3,2)$	0,6842	0,1380
$\alpha_{ij}(5,2)$	0,3158	0,1380
$\alpha_{ij}(3,3)$	0,4359	0,3731
$\alpha_{ik}(5,2)$	0,1624	0,1093
$\alpha_{ik}(3,3)$	0,8568	0,1035
$\alpha_{ik}(5,3)$	0,1432	0,1035
t_{21}	2,8812	0,6099
t_{22}	0,7164	0,8469
t_{33}	2,5048	0,0689
t_{41}	1,7362	2,1311
t_{52}	3,0391	1,4336
t_{53}	3,7732	0,0419



Figuur 15: uitstroom in- en uitgaande schakel voor tijdstep 1 tot 5 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)



Figuur 16: uitstroom in- en uitgaande schakel voor tijdstep 6 tot 10 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)

7.4.3 Kalibratie van w_{ij} en w_{ik}

Keuze van te kalibreren parameters en beperkingen

In sectie 6.4.3 werd reeds aangehaald dat w_{i4j1} en w_{i4k1} niet veranderen doorheen de tijd. Vandaar dat deze twee parameters constant worden verondersteld en voor alle andere w_{ij} en w_{ik} parameters die verschillend zijn van 0 een parameter wordt gedefinieerd per tijdstap. Het gaat om de parameters w_{i2j3} , w_{i2k1} , w_{i2k2} , w_{i3j2} , w_{i3j3} , w_{i3k3} , w_{i5j2} , w_{i5k2} , w_{i5k3} . Dat maakt het totaal aantal te kalibreren parameters gelijk aan 92, waarvan er 21 relevant zullen blijken. De beperkingen die geformuleerd werden in sectie 6.4.3, zijn ook hier van kracht per tijdstap. Voor elke parameter is ook een ondergrens van 0 en een bovengrens van 1 geldig.

Resultaten

Opnieuw werden 200 verschillende startwaarden gekozen voor de kalibratie en zijn de beste resultaten behouden. Uit het resultaat blijkt dat alle 200 resultaten dezelfde doelfunctiewaarde van 884 opleveren, wat opnieuw op convexiteit wijst. Deze waarde is ongeveer dezelfde als in sectie 7.3.1. De reden voor deze afwijking ligt opnieuw in de onderschatting van de t_{ik} parameters. Van deze kalibratie zijn geen figuren bijgevoegd die de fit van de uitstroom visualiseren. Deze zijn immers identiek aan diegene uit sectie 7.3.1.

Door de keuze van de α_{ij} en α_{ik} parameters, zullen de w_{ij} en w_{ik} parameters die horen bij α_1 tot α_4 , opnieuw geen rol spelen. De redenering die hierachter zit, werd uitgebreid besproken in sectie 6.4.3. Daarenboven, zullen de w_{ij} en w_{ik} parameters die bijdragen tot de berekening van de α_i parameters van tijdstap 1, 7 en 10 ook niet nuttig blijken aangezien de α_i parameters in deze tijdstappen geen rol spelen.

Er blijven dus nog 21 parameters over die onderzocht kunnen worden, namelijk de parameters w_{i5j2} , w_{i5k2} , w_{i5k3} voor tijdstap 2, 3, 4, 5, 6, 8 en 9. Voor elk van deze tijdstappen zijn er dus drie parameters (w_{i5j2} , w_{i5k2} , w_{i5k3}) die met behulp van een lineaire combinatie met de vaste α_{ij} en α_{ik} parameters moeten zorgen dat α_5 zodanig is dat de ratio van α_5 en α_3 in het juiste interval terecht komt. Daarnaast moet de som van deze drie wegingsparameters ook telkens gelijk zijn aan 1. Dat betekent dat er dus nog wat vrijheid is voor deze wegingsparameters. Hoeveel speling er is, hangt sterk af van de grootte en de variatie van de α_{ij} en α_{ik} parameters en de grootte van het interval waarbinnen α_5 moet vallen. Tabel 12 geeft de gemiddelden, standaarddeviaties en theoretische waarden van deze parameters. Blijkt dat de gemiddelde waarden geen enkel verband lijken te hebben met de theoretische gewichten.

Met de gekalibreerde gewichten en de vaste α_{ij} en α_{ik} parameters, kunnen de α_5 parameters berekend worden (Appendix E Tabel 33, Tabel 34 en Tabel 35). Na een vergelijking met de ondergrenzen die berekend zijn vanuit de gemeten uitstroom, blijkt dat de ratio van α_5 en α_3 er niet altijd aan voldoet. Dit is best logisch, aangezien de stromen ook niet goed gekalibreerd geraken.

Merk op dat ook hier de activatie van de interne en externe beperkingen dezelfde is als in realiteit. Hoe dit aangetoond wordt, is besproken in sectie 7.3.1.

Tabel 12: resultaten kalibratie w_{ij} en w_{ik} op metingen

Parameters	Gemiddelde	Standaarddeviatie	Theoretische waarde
$w_{i5j2}(2)$	0,3887	0,1613	0,0993
$w_{i5k2}(2)$	0,3050	0,0954	0,5191
$w_{i5k3}(2)$	0,3063	0,1046	0,3816
$w_{i5j2}(3)$	0,3823	0,1296	0,1233
$w_{i5k2}(3)$	0,3090	0,0942	0,5479
$w_{i5k3}(3)$	0,3087	0,0876	0,3288
$w_{i5j2}(4)$	0,4135	0,1546	0,1096
$w_{i5k2}(4)$	0,2580	0,1043	0,5316
$w_{i5k3}(4)$	0,3285	0,1232	0,3588
$w_{i5j2}(5)$	0,4371	0,1306	0,1150
$w_{i5k2}(5)$	0,2180	0,0378	0,5380
$w_{i5k3}(5)$	0,3449	0,1182	0,3470
$w_{i5j2}(6)$	0,3878	0,1500	0,1044
$w_{i5k2}(6)$	0,3031	0,0981	0,5253
$w_{i5k3}(6)$	0,3091	0,0997	0,3703
$w_{i5j2}(8)$	0,3794	0,1300	0,1205
$w_{i5k2}(8)$	0,3088	0,0967	0,5446
$w_{i5k3}(8)$	0,3118	0,1000	0,3349
$w_{i5j2}(9)$	0,3779	0,1366	0,1408
$w_{i5k2}(9)$	0,3041	0,1005	0,5690
$w_{i5k3}(9)$	0,3181	0,1095	0,2902

7.4.4 Kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik}

Keuze van te kalibreren parameters en beperkingen

Deze kalibratie gaat verder op de kalibratie uit sectie 7.4.3 en voegt de t_{ik} parameters toe aan de te kalibreren parameters. Dat maakt het totaal aantal variabelen dat gekalibreerd wordt, gelijk aan 98. De beperkingen voor de w_{ij} en w_{ik} parameters blijven dezelfde als in de kalibratie van sectie 6.4.3. De bezettijden krijgen een ondergrens van 0 en een bovengrens van 20.

Resultaten

Van de 200 kalibraties, zijn er 4 met een doelfunctie van ongeveer 94. De fit van de uitstroom is weergegeven in Figuur 17 en Figuur 18. Door het mee kalibreren van de t_{ik} parameters is deze fit opnieuw een stuk beter dan diegene in sectie 7.4.3. De kwaliteit van de fit is dezelfde als in sectie 7.3.2 en 7.4.2.

Wat betreft de w_{ij} en w_{ik} parameters, kan op dezelfde manier geredeneerd worden als in sectie 7.4.3. De w_{ij} en w_{ik} parameters die daar gerapporteerd werden, zijn hier ook te vinden in Tabel 13. Uit de resultaten blijkt dat de standaarddeviatie relatief groot is ten opzichte van de gemiddelde waarde.

In deze tabel zijn ook de resultaten te vinden voor de gekalibreerde t_{ik} parameters. Opnieuw kan hier geobserveerd worden dat de afwijking op t_{33} en t_{53} veel kleiner is dan de afwijking op de andere t_{ik} parameters. De standaarddeviatie op t_{33} is 3% van de gemiddelde waarde en bij t_{53} is dit 1%. De gemiddelde waarden voor deze bezettijden liggen ook dicht bij diegene die resulteren uit de kalibraties uit sectie 7.3.2 en 7.4.2.

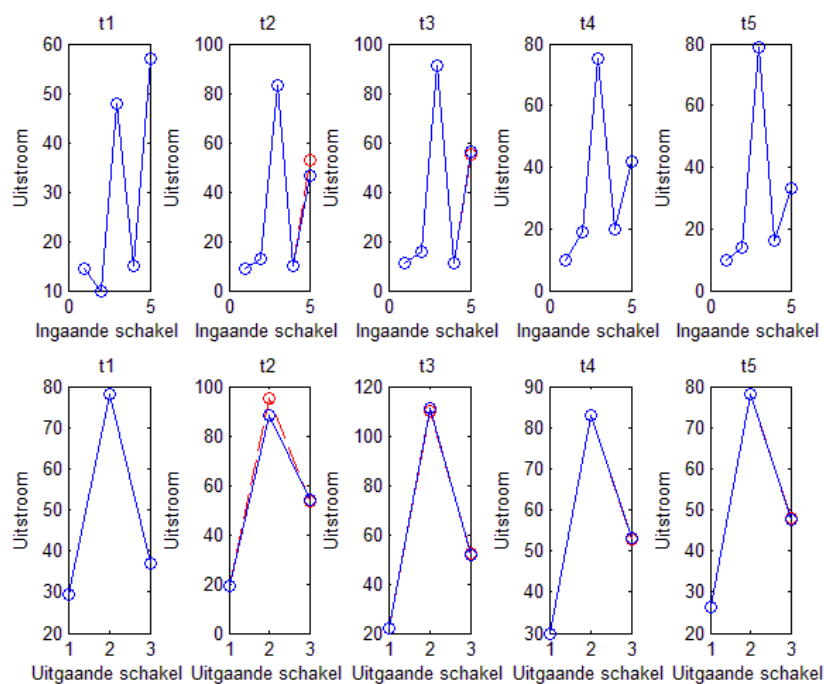
De fit van deze kalibratie is redelijk goed en even goed als de fit van de kalibratie uit sectie 7.4.2. De resulterende parameters zouden hier dus ook gebruikt kunnen worden voor een validatie. De verwachting is dan echter opnieuw dat de fit bij een validatie slecht zou kunnen uitvallen wanneer het verkeerspatroon waarmee gevalideerd wordt iets anders is dan hetgeen waarmee gekalibreerd is. Dit omdat de werkelijke verhouding van α_3 en α_5 in de dataset voor kalibratie niet aan bod komt.

Voor de drie beste resultaten wordt de waarde van α_5 berekend met behulp van de gekalibreerde gewichten en de theoretische α_{ij} en α_{ik} parameters (Appendix E Tabel 36, Tabel 37 en Tabel 38). Deze waarden worden vergeleken met de bovengrens die reeds bepaald kon worden met de gemeten uitstroom. Blijkt dat deze waarden over het algemeen onder deze bovengrens vallen. Een enkele uitzondering is tijdstap 9, waarin de berekende α_5 net boven de bovengrens ligt. Dit is echter te verklaren door het feit dat de uitstroom in tijdstap 9 geen perfecte fit geeft met de gekalibreerde uitstroom. Vandaar dat de gekalibreerde α_5 wat afwijkt.

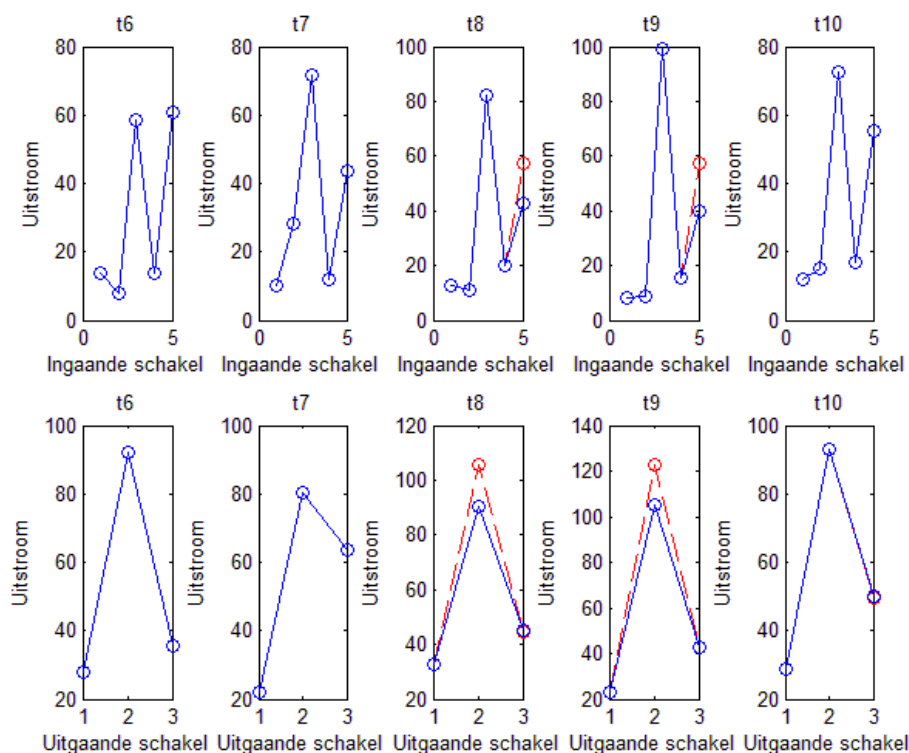
Merk op dat ook hier de activatie van de interne en externe beperkingen dezelfde is als in realiteit. Hoe dit aangetoond wordt, is besproken in sectie 7.3.1.

Tabel 13: resultaten kalibratie w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op metingen

Parameters	Gemiddelde	Standaarddeviatie	Theoretische waarde
$w_{i5j2}(2)$	0,3556	0,1547	0,0993
$w_{i5k2}(2)$	0,2862	0,0555	0,5191
$w_{i5k3}(2)$	0,3582	0,1208	0,3816
$w_{i5j2}(3)$	0,3531	0,0772	0,1233
$w_{i5k2}(3)$	0,2011	0,0558	0,5479
$w_{i5k3}(3)$	0,4458	0,0460	0,3288
$w_{i5j2}(4)$	0,4231	0,0928	0,1096
$w_{i5k2}(4)$	0,2334	0,1454	0,5316
$w_{i5k3}(4)$	0,3435	0,1252	0,3588
$w_{i5j2}(5)$	0,5413	0,0855	0,1150
$w_{i5k2}(5)$	0,1392	0,0604	0,5380
$w_{i5k3}(5)$	0,3195	0,0466	0,3470
$w_{i5j2}(6)$	0,4155	0,1889	0,1044
$w_{i5k2}(6)$	0,2532	0,0934	0,5253
$w_{i5k3}(6)$	0,3313	0,1291	0,3703
$w_{i5j2}(8)$	0,3619	0,1252	0,1205
$w_{i5k2}(8)$	0,2286	0,0642	0,5446
$w_{i5k3}(8)$	0,4095	0,1485	0,3349
$w_{i5j2}(9)$	0,4761	0,1126	0,1408
$w_{i5k2}(9)$	0,1924	0,0503	0,5690
$w_{i5k3}(9)$	0,3316	0,1093	0,2902
t_{21}	3,1082	1,1013	1,0000
t_{22}	1,5611	0,6728	1,0000
t_{33}	2,3909	0,0725	1,0000
t_{41}	1,6524	0,3257	2,0000
t_{52}	2,6086	1,4529	2,0000
t_{53}	3,8436	0,0421	2,0000



Figuur 17: uitstroom in- en uitgaande schakels voor tijdstap 1 tot 5 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)



Figuur 18: uitstroom in- en uitgaande schakels voor tijdstap 6 tot 10 (blauw=meetwaarden, rood=gekalibreerde uitstroom)

7.4.5 Besluit

Uit deze kalibraties blijkt opnieuw dat de theoretische formule voor de t_{ik} parameters in deze omstandigheden niet gepast is. Vandaar dat van deze vier kalibraties, diegene die de t_{ik} parameters meenemen in de kalibratie de interessantste zijn.

De doelfunctiewaarden van de beste parametersets zijn voor de kalibratie uit sectie 7.4.2 en sectie 7.4.4 ongeveer gelijk. Ook het aantal parametersets dat deze laagste doelfunctiewaarden levert, is gelijkaardig. Voor beide kalibraties is de fit van de uitstroom best goed. Er is op dit vlak dus geen reden om een van de kalibraties te verkiezen.

Wat betreft de waarden van de gekalibreerde α_{ij} en α_{ik} parameters, zit er wel wat speling op. Dit is logisch, aangezien de α_i ratio niet eenduidig bepaald is. Toch zit er een zekere trend in de gemiddelde waarden die overeen komt met een intuïtieve schatting van deze voorrangsparementen. Wanneer de bezettijden mee gekalibreerd worden, zit er meer variatie op de α_{ij} en α_{ik} parameters.

Wat betreft de w_{ij} en w_{ik} parameters, is er ook speling aanwezig. Deze parameters lijken echter geen enkel verband te hebben met de theoretisch berekende gewichten.

Wat betreft de t_{ik} parameters, is er wel eenduidigheid in de schatting van de parameters t_{33} en t_{53} .

Aangezien de kalibratie uit 7.4.2 en de kalibratie uit 7.4.4 een even goede fit van de uitstroom opleveren, kan op basis van de beste parameterset van een van beide kalibraties een validatie uitgevoerd worden. Het feit dat de gekalibreerde gewichten veel meer 'random' zijn dan de α_{ij} en α_{ik} parameters, is een reden om bij een validatie toch te kiezen voor de α_{ij} en α_{ik} parameters. De verwachting bij validatie op een andere dataset, is dat de fit iets minder goed zal zijn dan bij de kalibratie.

Merk ten slotte op dat een kalibratie van de α_{ij} en α_{ik} parameters algemeen gesproken ook meer zal opleveren dan een kalibratie van de gewichten. Er zijn immers meer beperkingen geldig voor deze parameters aangezien deze constant verondersteld worden in de tijd. Ten tweede zullen er ook minder variabelen te kalibreren zijn. Een derde argument is het feit dat deze parameters intuïtief makkelijker te interpreteren zijn dan de gewichten.

7.5 Besluit

In dit hoofdstuk zijn de ontwikkelde kalibratieprogramma's toegepast op de metingen. In deze metingen zijn er tijdstappen waarin geen enkel conflict geactiveerd wordt. In een aantal tijdstappen wordt het aanbod op intern conflictpunt 3 volledig benut en in een aantal tijdstappen wordt het aanbod op uitgaande schakel 2 volledig opgebruikt. Dit levert twee verschillende regimes op. In het ene regime is het interne conflictpunt 3 geactiveerd en staat er een structurele file op ingaande schakel 5. In het andere regime is de aanbodbeperking op uitgaande schakel 2 dominant. Opnieuw staat er een structurele file op ingaande schakel 5, maar wordt intern conflictpunt 3 niet volledig benut.

Een eerste inzicht dat verworven is bij het kalibreren, is het feit dat de theoretische formule voor de bezettijden in dit concrete geval niet realistisch is. Het gebruik van deze formule leidt namelijk tot een sterke overschatting van de voertuigstromen over intern conflictpunt 3. Dit is te wijten aan het feit dat deze formule geen rekening houdt met het 'gap acceptance' fenomeen. In combinatie met een voertuigstroom op de hoofdweg die niet in file staat, geeft dit onrealistische resultaten. Merk ook op dat de kalibraties waarbij de t_{ik} parameters niet mee gekalibreerd worden, convexe problemen zijn.

Om een goede fit te krijgen van de uitstroom is het bij deze gevalstudie dus noodzakelijk om de t_{ik} parameters mee te kalibreren. Het gaat dan vooral om de parameters t_{33} en t_{53} die een rol spelen op het actieve conflictpunt. Deze waarden nemen in de kalibratie van de α_i parameters, de kalibratie van de α_{ij} , α_{ik} parameters en de kalibratie van de gewichten w_{ij} en w_{ik} , telkens een gelijkaardige waarde aan die ook aannemelijk en eenduidig bepaald is. Het verschil tussen de gekalibreerde en gemeten uitstroom is bij deze kalibraties telkens hetzelfde en klein genoeg om van een goede fit te kunnen spreken.

Merk op dat de parameters niet gevalideerd zijn. Als de metingen voor validatie uitgevoerd worden op een moment dat het op ingaande schakel 3 veel drukker is, zou het kunnen dat de t_{33} parameter toch een overschatting blijkt en dat de fit een stuk minder goed is. Een validatie voor deze parameters zou dus interessant zijn.

Wat betreft de kalibratie op het bovenliggende niveau, kan dezelfde conclusie getrokken worden als in Hoofdstuk 6. Met behulp van de gemeten uitstroom is het immers mogelijk om op een analytische manier een boven- of ondergrens of een ratio uit te rekenen voor de α_i verhoudingen. Aangezien er voor de geactiveerde conflicten in dit geval telkens slechts file aanwezig is op 1 ingaande schakel, kan per tijdstap enkel een bovengrens bepaald worden voor de ratio van α_5 op α_3 . Hiervoor is dus helemaal geen kalibratie van de α_i parameters nodig.

Wat betreft het onderliggende niveau, blijkt dat de kalibraties uit sectie 7.4.2 en 7.4.4 gelijkaardige resultaten geven wat betreft de fit en het aantal parametersets waarmee

die bereikt wordt. Voor beide kalibraties geldt dat geen eenduidige set van parameters kan gevonden worden. Toch zijn er een drietal redenen om de kalibratie van de α_{ij} en α_{ik} parameters te verkiezen. Eerst en vooral is het immers zo dat voor de α_{ij} en α_{ik} parameters meer beperkingen gelden aangezien deze constant blijven over alle tijdstappen heen. Ten tweede zijn er ook minder te kalibreren variabelen dan bij een kalibratie van de gewichten. Ten derde zijn deze parameters ook makkelijker intuïtief te interpreteren. Dit zijn dan ook parameters die een kruispunt (en het rijgedrag op dit kruispunt) typeren terwijl de gewichten afhangen van de afslagfracties van een bepaalde tijdstap.

Bij het kalibreren op het onderliggende niveau zijn telkens ook de resulterende α_i ratio's van het bovenliggende model berekend. Blijkt dat deze niet altijd de grenzen respecteren zoals deze berekend kunnen worden met behulp van de uitstroom. Dat komt doordat de fit op de uitstroom ook niet perfect is. Bij het bovenliggende model is dezelfde observatie geldig.

Hoofdstuk 8: Lessen voor een toekomstige kalibratie/validatie

Het doel van dit hoofdstuk is om met de opgedane kennis en ervaring vanuit de uitgevoerde kalibraties suggesties te doen naar toekomstige kalibraties en validaties. Eerst wordt wat dieper ingegaan op wat de voorwaarden zijn voor een eenduidige oplossing van de kalibratie. Daarna volgt een samenvatting van wat besloten kan worden wat betreft de validiteit van het model. Ten slotte volgt nog wat uitleg over hoe een kalibratie/validatie van het knooppmodel kan uitgevoerd worden in de toekomst.

8.1 Voorwaarden voor een eenduidige oplossing

Het concrete geval dat in deze masterproef bestudeerd is, heeft geen eenduidige oplossing op het bovenliggende kalibratieniveau. Dat betekent dat ook op het onderliggende niveau geen eenduidige set van parameters verkozen kan worden. Dan rijst de vraag of er in andere omstandigheden wel een eenduidige oplossing kan verkregen worden.

8.1.1 Bovenliggend niveau

Wat betreft de bepaling van de α_i parameters, kan een eenduidige verhouding van de parameters wel bekomen worden. Als er een structurele file aanwezig is op alle ingaande schakels die gebruik maken van een intern of extern conflictpunt en deze voertuigstromen zijn niet verhinderd door een beperkt aanbod op andere conflictpunten, dan zullen alle ingaande schakels hun rechtmatig deel van dit aanbod opeisen. Zo is het dus mogelijk om aan de hand van de uitstroom te berekenen wat de α_i ratio('s) is (zijn) van de betrokken ingaande schakels.

Als niet op alle ingaande schakels die gebruik maken van het betreffende conflictpunt een vraagoverschot staat, dan kan enkel een boven- of ondergrens bepaald worden voor deze α_i ratio('s). Deze boven- of ondergrens kan eventueel wel aangepast worden door het leereffect van verschillende metingen. Merk wel op dat het model veronderstelt dat α_i parameters afhankelijk zijn van de afslagfracties. Wanneer deze dus variëren doorheen de tijd, dient voor elke tijdstap een nieuwe α_i parameter

gedefinieerd te worden en kan de boven- of ondergrens niet bijgesteld worden door een 'leereffect'.

8.1.2 Onderliggend niveau

Wanneer de ratio van de α_i parameters eenduidig bepaald is, geeft dit ook striktere voorwaarden aan het onderliggende model. Omwille van het feit dat enkel de ratio van α_i parameters vast is, kan er toch nog wat speling zitten op de parameters van het onderliggende model. In vergelijking 26 van sectie 3.3 is zichtbaar hoe de parameters gecombineerd worden tot de bepaling van α_i . Merk op dat de configuratie van het kruispunt, meer bepaald het aantal gedefinieerde conflictpunten, het aantal ingaande en uitgaande schakels en het al dan niet aanwezig zijn van afslagfracties een grote invloed hebben op het al dan niet eenduidig bepaald zijn van deze parameters.

Bij het kalibreren van de α_{ij} en α_{ik} parameters, is het een voordeel wanneer het kruispunt tijdsafhankelijke afslagfracties heeft. Dat betekent dat de gewichten in vergelijking 26 uit sectie 3.3 zullen verschillen voor elke tijdstap. Hierdoor worden meer beperkingen opgelegd aan de α_{ij} en α_{ik} parameters die constant worden verondersteld doorheen de tijd.

Bij het kalibreren van de w_{ij} en w_{ik} parameters, is de aanwezigheid van afslagfracties niet voordelig. Deze parameters moeten dan volgens het model immers gedefinieerd worden per tijdstap.

Ondanks een eenduidige bepaling van de α_i ratio, kan het dus best zijn dat de parameters van het onderliggende model niet eenduidig bepaald zijn. Hoe meer data er zijn waarin daarenboven ook verschillende beperkingen actief zijn, hoe meer kans er is op een eenduidige oplossing.

8.2 Validiteit van het kruispuntmodel

Hoewel in deze masterproef geen validatie is uitgevoerd, kan over de validiteit van het knooppuntmodel toch een en ander gezegd worden. De kalibratie is er immers in geslaagd om een set van parameters te identificeren die, in combinatie met het knooppuntmodel, de fit van de uitstroom goed benadert. Deze set van parameters is echter niet eenduidig bepaald.

Bij de kalibratie van de α_{ij} en α_{ik} parameters, blijkt dat deze wel intuïtief aanvaardbaar zijn. De rol van deze parameters in het knooppuntmodel wordt door de kalibratie dus zeker niet tegengesproken.

Wat betreft het gebruikte knooppuntmodel kan ook een uitspraak gedaan worden over de manier waarop de theoretische formule de t_{ik} parameters bepaalt. In de concrete gevalstudie van deze masterproef leverde het gebruik van deze formule geen goede resultaten. De formule is dan ook ontworpen om gebruikt te worden in situaties

waarbij de ingaande schakels te kampen hebben met een vraagoverschot. Niettegenstaande het feit dat de formule niet succesvol bleek te zijn in dit concrete geval, zou deze in andere omstandigheden wel waardevol kunnen zijn. Dit bijvoorbeeld wanneer op alle ingaande schakels die concurreren om het aanbod van een conflictpunt, een vraagoverschot staat. De bezettijden zijn dus eigenlijk verkeersafhankelijk.

Voor het uitvoeren van een validatie is het noodzakelijk om over minstens twee datasets te beschikken die best op een andere dag verkregen zijn. Een dataset zou dan gebruikt worden voor een kalibratie. De tweede zou dan dienen voor de validatie.

8.3 Hoe een kalibratie/validatie uit te voeren in de toekomst

Om een succesvolle kalibratie en validatie uit te voeren is het eerst en vooral nodig om op een kruispunt te werken waar een conflictpunt volledig wordt benut door voertuigen vanuit ingaande schakels die vaak tegelijk met een vraagoverschot te kampen hebben. Hierbij is het dus belangrijk dat alle ingaande schakels van waaruit voertuigen naar dit conflictpunt toe gaan, tegelijk met een vraagoverschot zitten.

Eerst en vooral kunnen met behulp van de uitstroom over het kruispunt, de α_i ratio's per tijdstap bepaald worden. Hiervoor is dus geen kennis vereist van de bezettijden. Wanneer de afslagfracties van de ingaande schakels niet tijdsafhankelijk zijn, zouden deze ratio's volgens het model gelijk moeten zijn voor alle tijdstappen. In de praktijk wordt echter verwacht dat deze ratio's wel zullen variëren.

Op het onderliggende niveau, is het wel nuttig om een kalibratie uit te voeren. Als de betrokken ingaande schakels (idealiter) met een vraagoverschot zitten, zou de theoretische formule voor de t_{ik} parameters een beter resultaat moeten geven dan bij het geval in deze masterproef. Wanneer niet alle betrokken ingaande schakels een vraagoverschot hebben, dan is het gebruik van de theoretische formule niet aan te raden.

Bij een geval waarbij file staat op alle betrokken ingaande schakels, zou het interessant zijn om de kalibratie op het onderliggende niveau zowel met als zonder kalibratie van de t_{ik} parameters uit te voeren. Een vergelijking tussen de t_{ik} parameters zou interessante inzichten kunnen opleveren.

Bij een kalibratie van de α_{ij} en α_{ik} parameters (met of zonder t_{ik} kalibratie) zal er hoogstwaarschijnlijk speling zitten op de parameters. De speling heeft twee oorzaken: enerzijds het feit dat enkel de α_i ratio eenduidig bepaald is en niet de afzonderlijke α_i parameters. Dit euvel kan eventueel deels verholpen worden door het normaliseren van de α_i parameters. Anderzijds kan er ook speling geïntroduceerd worden door de manier waarop de lineaire combinatie van de α_{ij} en α_{ik} parameters met de gewichten tot een α_i waarde komt. Hoe meer de α_i ratio's of de gewichten verschillen doorheen de verschillende tijdstappen, hoe kleiner de

oplossingsruimte zal zijn. Een groter aantal tijdstappen met bijhorende data, komt de kalibratie van deze parameters dus ook alleen maar ten goede. Data waarin verschillende beperkingen sequentieel geactiveerd worden, zorgen ook voor een accuratere kalibratie van de α_{ij} en α_{ik} parameters.

Bij een kalibratie van de gewichten (met of zonder t_{ik} kalibratie) zal er hoogstwaarschijnlijk ook speling zijn. Dit enerzijds opnieuw omdat de afzonderlijke α_i parameters niet eenduidig bepaald zijn. Anderzijds voegt het onderliggende niveau ook speling toe door het grote aantal parameters. Immers, wanneer de gewichten tijdsafhankelijk zijn, worden de gewichten per tijdstap gedefinieerd. Een groter aantal tijdstappen met bijhorende data zal het oplossingsinterval dan dus niet kleiner maken.

Merk op dat bij het zoeken naar passende parameters van het knoopmodel ook mogelijkheden zijn voor handmatige kalibratie. De α_{ij} en α_{ik} parameters zijn intuïtief makkelijk te interpreteren. Vandaar dat het mogelijk is om op een intuïtieve manier een invulling te geven aan deze parameters en deze fijn te stellen op basis van de fit van de uitstroom. Een handmatige kalibratie van de gewichten zal moeilijk uitvoerbaar zijn omwille van het feit dat deze moeilijk intuïtief te schatten zijn. Wat betreft de t_{ik} parameters, zouden deze ook proefondervindelijk kunnen fijn gesteld worden.

In toekomstig onderzoek zou gebruik kunnen gemaakt worden van de kennis van de trajectoriën van elk afzonderlijk voertuig over het kruispunt. Hiermee kan op microniveau bestudeerd worden hoe voertuigen concurreren om het aanbod op interne conflictpunten en op uitgaande schakels.

Wat betreft de grootte van de dataset voor de kalibratie, geldt dat deze best zo groot mogelijk is. Hoe meer verschillende scenario's voorkomen in deze dataset, hoe meer parameters kunnen gekalibreerd worden. Wat betreft de validatie, is het best om een dataset te gebruiken die verschilt van diegene waarmee gekalibreerd is.

Hoofdstuk 9: Besluit

Deze masterproef start met een algemene literatuurstudie waarin het onderwerp van kruispuntmodellering geplaatst wordt in het ruimere kader van 'Dynamic Traffic Assignment' en 'Dynamic Network Loading'. De verschillende functies en types van knooppmodellen worden toegelicht en de onderzoeksvraag en aanpak worden geformuleerd.

Om een realistisch knoopmodel te verkrijgen is het noodzakelijk om rekening te houden met zowel de externe als de interne beperkingen van het kruispunt. Het nadeel van dit soort modellen is het feit dat meerdere oplossingen kunnen voorkomen. Vandaar dat in Hoofdstuk 3 ook een praktische methode geformuleerd is die een eenduidige oplossing garandeert.

Om de kalibratie te kunnen uitvoeren met realistische data, wordt een meting georganiseerd. In Hoofdstuk 4 is de keuze van het kruispunt besproken. Het is belangrijk om een kruispunt te gebruiken waar filevorming optreedt en een extern en/of intern conflictpunt dus geactiveerd wordt. Bij de overgang van het realistische kruispunt naar de modelweergave worden de in- en uitgaande schakels, conflictpunten en afslagfracties gedefinieerd. De metingen zelf zijn uitgevoerd met behulp van drie camera's op verschillende locaties en hoogtes.

In Hoofdstuk 5 wordt de algemene aanpak van de kalibratie toegelicht. De parameters die meegenomen worden in de kalibratie zijn α_i , α_{ij} , α_{ik} , w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} . Het kalibratiemodel werkt met de functie 'fmincon' uit Matlab. Deze functie vraagt een set van startwaarden voor alle variabelen die gekalibreerd moeten worden. Door op iteratieve wijze een doelfunctie uit te rekenen en een nieuwe set van parameters te selecteren, zoekt dit optimalisatiealgoritme een minimum. Een aantal verschillende varianten van doelfuncties worden geformuleerd. Om het resultaat van de verschillende kalibraties te beoordelen, kan gekeken worden naar de doelfunctiewaarde. Daarnaast is het ook interessant om te kijken welke conflicten volgens de gekalibreerde stromen geactiveerd worden en of de gekalibreerde parameters enigszins plausibele waarden aannemen.

In Hoofdstuk 6 zijn de kalibraties van het opgestelde testscenario gerapporteerd. De doelfunctievariant die de beste resultaten garandeert, bestaat uit een term die verschillen op de uitstroom en de bezetting van interne conflictpunten bestraft. Met deze doelfunctie worden alle kalibraties uitgevoerd. Wanneer de bezettijden mee

gekalibreerd worden, blijft het algoritme makkelijker steken in een lokaal optimum. Het wordt duidelijk dat een kalibratie van de α_i parameters in de praktijk eigenlijk niet nodig is wanneer de uitstroom over het kruispunt gegeven is per tijdstap. Dan kan immers een boven- of ondergrens of zelfs de α_i verhouding van het betreffende conflictpunt analytisch bepaald worden. Wat betreft de kalibraties op het onderliggende niveau, kan besloten dat voor het testscenario blijkt dat de theoretisch bepaalde parameters goed benaderd worden door de kalibratie.

In Hoofdstuk 7 worden de metingen gebruikt bij het kalibreren. Uit deze kalibratie blijkt dat de theoretische formule voor de bezettijden zorgt voor een grote overschatting van de stromen over het kruispunt. Vandaar dat alle kalibraties waarbij de t_{ik} parameters mee gekalibreerd worden, een betere fit geven. Bij deze metingen is het zo dat voor de α_i ratio enkel een onder- of bovengrens kan bepaald worden op het beschouwde conflictpunt. Dat betekent dat ook op het onderliggende kalibratieniveau wat speling zit op de parameters. Op basis van de fit, kan er op het onderliggende niveau geen voorkeur geuit worden voor de kalibratie van de voorrangsparements of de gewichten. Voor beide kalibraties is de fit immers gelijkaardig en aanvaardbaar. Toch heeft de kalibratie van de voorrangsparements het voordeel dat deze parameters meer intuïtief zijn en invariant in de tijd.

In Hoofdstuk 8 worden de voorwaarden voor een eenduidige oplossing geformuleerd. Wat betreft het bovenliggende model, is het belangrijk dat de ingaande schakels die betrekking hebben op het beschouwde conflictpunt, een vraagoverschot hebben. Pas dan kan de α_i ratio rechtstreeks afgeleid worden uit de uitstroom. Wanneer de α_i ratio gekend is, kan in de onderliggende kalibratie nog steeds speling zitten. De grootte van de speling hangt af van de modelconfiguratie en de hoeveelheid aan beschikbare data.

Wat betreft de validiteit van het knooppmodel, kunnen ook enkele zaken besloten worden. Met behulp van de kalibraties zijn parametersets geïdentificeerd die in combinatie met het knooppmodel een goede fit van de uitstroom realiseren. Er is echter geen eenduidige set van parameters bekomen. De gekalibreerde waarden voor de α_{ij} en α_{ik} parameters zijn intuïtief aanvaardbaar en spreken de betekenis die er vanuit het knooppmodel aan gegeven wordt, niet tegen. Wat betreft de bezettijden kan besloten worden dat de theoretische formule zeker niet algemeen geldig is.

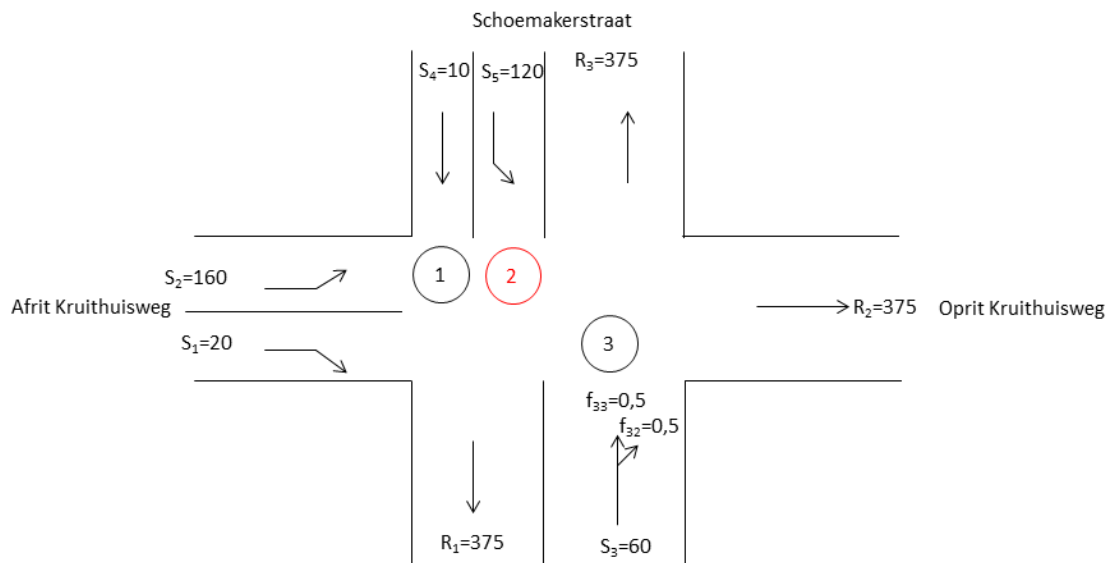
Bij een toekomstige kalibratie/validatie van het knooppmodel, zijn de data voor de kalibratie en validatie idealiter op een andere dag verzameld. Als alle ingaande schakels die betrekking hebben tot een conflictpunt met een vraagoverschot zitten en niet gehinderd worden door andere conflictpunten, kan de α_i ratio op dat conflictpunt bepaald worden. Voor het onderliggende niveau kan een kalibratie nuttige resultaten opleveren. Als er veel data er voor handen zijn en als de gewichten tijdsafhankelijk zijn, dan wordt de oplossingsruimte voor de onderliggende voorrangsparements steeds kleiner. Wat betreft de gewichten, zullen deze gedefinieerd moeten worden per tijdstap wanneer de afslagfracties variabel zijn. Een grotere hoeveelheid data beperkt in dit geval dus niet de oplossingsruimte.

Appendices

Appendix A: Manueel narekenen van het testscenario

In deze appendix wordt met behulp van de α_i waarden nogmaals de uitstroom nagerekend. Op onderstaande figuren per tijdstap wordt ook aangegeven welke conflictpunten volledig worden opgebruikt. Wanneer een conflictpunt volledig wordt opgebruikt, is het aangeduid in het rood. Wanneer dit conflictpunt volledig wordt opgebruikt en de α_i 's op dit punt bovendien ook exact de verhouding van de stromen over het kruispunt bepalen, dan is dit conflictpunt aangeduid in het groen.

In Figuur 19, Figuur 20, Figuur 21, Figuur 22 en Figuur 23 zijn tijdstappen 1 tot 5 visueel voorgesteld. Onderstaande berekeningen bepalen met behulp van de α_i ratio's per conflictpunt hoeveel voertuigen vanuit de ingaande schakels recht hebben op een oversteek. Per conflictpunt mag de som van de stromen maximaal gelijk zijn aan het aanbod van dit conflictpunt. Aangezien dit aanbod 3600 seconden is per uur en elk voertuig er 4 seconden over doet om het te overbruggen, kunnen per tijdstap van een kwartier 225 voertuigen gebruik maken van dit conflictpunt. Na de berekening voor de drie afzonderlijke conflictpunten, worden de resultaten met elkaar vergeleken en worden de resulterende stromen bepaald. Enkel in tijdstap 5 wordt ook een extern conflictpunt geactiveerd, omdat het aanbod op de uitgaande schakel lager is dan de vraag.



Figuur 19: tijdstap 1 van testscenario

Conflictpunt 1

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_4} = \frac{0,2}{0,8} = \frac{q_2}{q_4}$$

$$q_2 + q_4 = 225$$

$$q_2 = 45 \text{ en } q_4 = 180$$

Oplossing: $q_2 = 105$ en $q_4 = 10$

Conflictpunt 2

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_5} = \frac{0,2}{0,5571} = \frac{q_2}{q_5}$$

$$q_2 + q_5 = 225$$

$$q_5 = 165 \text{ en } q_2 = 60$$

Oplossing: $q_5 = 120$ en $q_2 = 105$

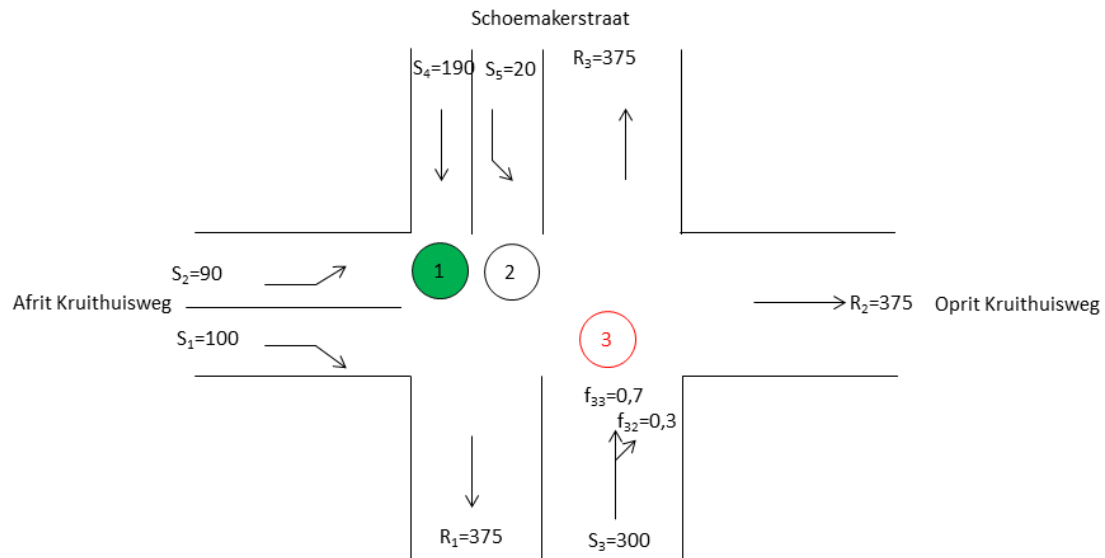
Conflictpunt 3

$$\frac{\alpha_3}{\alpha_5} = \frac{0,8}{0,5571} = \frac{q_3}{q_5}$$

$$0,5q_3 + q_5 = 225$$

$$q_5 = 131 \text{ en } q_3 = 188$$

Oplossing: $q_5 = 120$ en $q_3 = 60$



Figuur 20: tijdstap 2 van testscenario

Conflictpunt 1

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_4} = \frac{0,2}{0,8} = \frac{q_2}{q_4}$$

$$q_2 + q_4 = 225$$

$$q_2 = 45 \text{ en } q_4 = 180$$

Oplossing: $q_2 = 45$ en $q_4 = 180$

Conflictpunt 2

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_5} = \frac{0,2}{0,5319} = \frac{q_2}{q_5}$$

$$q_2 + q_5 = 225$$

$$q_5 = 163 \text{ en } q_2 = 62$$

Oplossing: $q_5 = 20$ en $q_2 = 45$

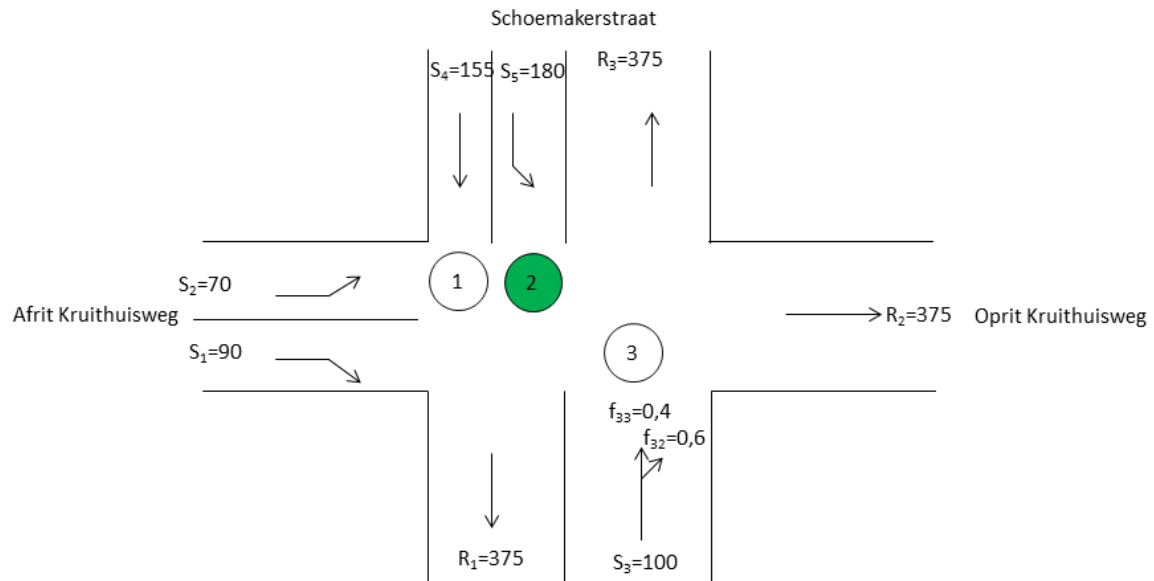
Conflictpunt 3

$$\frac{\alpha_3}{\alpha_5} = \frac{0,8}{0,5319} = \frac{q_3}{q_5}$$

$$0,7q_3 + q_5 = 225$$

$$q_5 = 110 \text{ en } q_3 = 164$$

Oplossing: $q_5 = 20$ en $q_3 = 293$



Figuur 21: tijdstap 3 van testscenario

Conflictpunt 1

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_4} = \frac{0,2}{0,8} = \frac{q_2}{q_4}$$

$$q_2 + q_4 = 225$$

$$q_2 = 45 \text{ en } q_4 = 180$$

Oplossing: $q_2 = 58$ en $q_4 = 155$

Conflictpunt 2

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_5} = \frac{0,2}{0,5713} = \frac{q_2}{q_5}$$

$$q_2 + q_5 = 225$$

$$q_5 = 167 \text{ en } q_2 = 58$$

Oplossing: $q_5 = 167$ en $q_2 = 58$

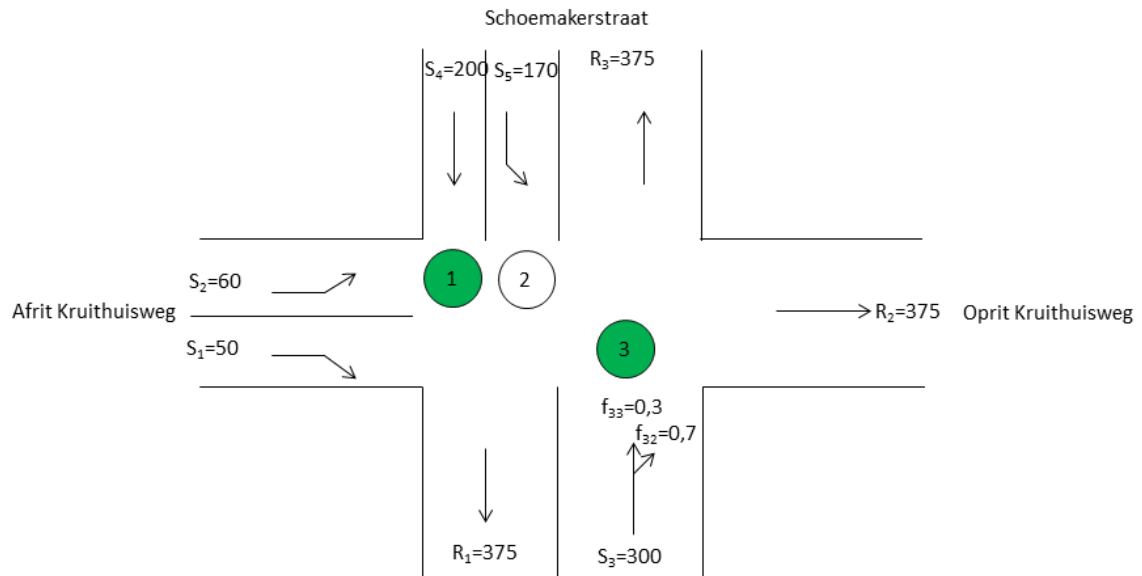
Conflictpunt 3

$$\frac{\alpha_3}{\alpha_5} = \frac{0,8}{0,5713} = \frac{q_3}{q_5}$$

$$0,4q_3 + q_5 = 225$$

$$q_5 = 144 \text{ en } q_3 = 202$$

Oplossing: $q_5 = 167$ en $q_3 = 100$



Figuur 22: tijdstap 4 van testscenario

Conflictpunt 1

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_4} = \frac{0,2}{0,8} = \frac{q_2}{q_4}$$

$$q_2 + q_4 = 225$$

$$q_2 = 45 \text{ en } q_4 = 180$$

Oplossing: $q_2 = 45$ en $q_4 = 180$

Conflictpunt 2

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_5} = \frac{0,2}{0,5866} = \frac{q_2}{q_5}$$

$$q_2 + q_5 = 225$$

$$q_5 = 168 \text{ en } q_2 = 57$$

Oplossing: $q_5 = 160$ en $q_2 = 45$

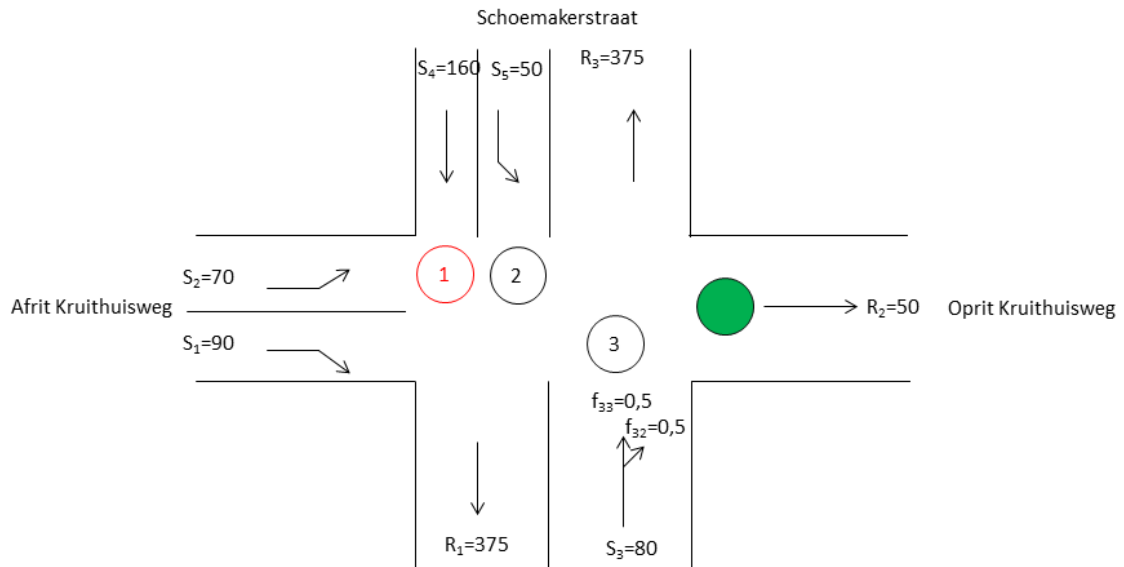
Conflictpunt 3

$$\frac{\alpha_3}{\alpha_5} = \frac{0,8}{0,5866} = \frac{q_3}{q_5}$$

$$0,3q_3 + q_5 = 225$$

$$q_5 = 160 \text{ en } q_3 = 217$$

Oplossing: $q_5 = 160$ en $q_3 = 217$



Figuur 23: tijdstap 5 van testscenario

Conflictpunt 1

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_4} = \frac{0,2}{0,8} = \frac{q_2}{q_4}$$

$$q_2 + q_4 = 225$$

$$q_2 = 45 \text{ en } q_4 = 180$$

Oplossing: $q_2 = 65$ en $q_4 = 160$

Conflictpunt 2

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_5} = \frac{0,2}{0,5866} = \frac{q_2}{q_5}$$

$$q_2 + q_5 = 225$$

$$q_5 = 168 \text{ en } q_2 = 57$$

Oplossing: $q_5 = 29$ en $q_2 = 65$

Conflictpunt 3

$$\frac{\alpha_3}{\alpha_5} = \frac{0,8}{0,5571} = \frac{q_3}{q_5}$$

$$0,5q_3 + q_5 = 225$$

$$q_5 = 131 \text{ en } q_3 = 188$$

Oplossing: $q_5 = 29$ en $q_3 = 42$

Extern conflict

$$\frac{\alpha_3}{\alpha_5} = \frac{0,8}{0,5571} = \frac{q_3}{q_5}$$

$$0,5q_3 + q_5 = 50$$

$$q_5 = 29 \text{ en } q_3 = 42$$

Oplossing: $q_5 = 29$ en $q_3 = 42$

Appendix B: Waarden voor w_{ij} en w_{ik} per tijdstap (kalibratie testscenario)

$$\begin{aligned}
 w_{ij}(1) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0826 \\ 0 & 0,2093 & 0,2093 \\ 0,2647 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1071 & 0 \end{bmatrix} & w_{ik}(1) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,4587 & 0,4587 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5814 \\ 0,7353 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5952 & 0,2976 \end{bmatrix} \\
 w_{ij}(2) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1119 \\ 0 & 0,1019 & 0,2377 \\ 0,2647 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0597 & 0 \end{bmatrix} & w_{ik}(2) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,444 & 0,444 & 0 \\ 0 & 0 & 0,6604 \\ 0,7353 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5531 & 0,3872 \end{bmatrix} \\
 w_{ij}(3) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0672 \\ 0 & 0,2842 & 0,1895 \\ 0,2647 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1337 & 0 \end{bmatrix} & w_{ik}(3) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,4664 & 0,4664 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5263 \\ 0,7353 & 0 & 0 \\ 0 & 0,6188 & 0,2475 \end{bmatrix} \\
 w_{ij}(4) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0512 \\ 0 & 0,3818 & 0,1636 \\ 0,2647 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1624 & 0 \end{bmatrix} & w_{ik}(4) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,4744 & 0,4744 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4545 \\ 0,7353 & 0 & 0 \\ 0 & 0,6443 & 0,1933 \end{bmatrix} \\
 w_{ij}(5) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0826 \\ 0 & 0,2093 & 0,2093 \\ 0,2647 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1071 & 0 \end{bmatrix} & w_{ik}(5) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,4587 & 0,4587 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5814 \\ 0,7353 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5952 & 0,2976 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Appendix C: Waarden voor w_{ij} en w_{ik} per tijdstap (kalibratie metingen)

$$\begin{aligned}
 w_{ij}(1) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4565 \\ 0 & 0,2075 & 0,5283 \\ 0,1111 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0823 & 0 \end{bmatrix} & w_{ik}(1) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,2717 & 0,2717 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2642 \\ 0,8889 & 0 & 0 \\ 0 & 0,4988 & 0,4190 \end{bmatrix} \\
 w_{ij}(2) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4236 \\ 0 & 0,2576 & 0,4949 \\ 0,1111 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0993 & 0 \end{bmatrix} & w_{ik}(2) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,2882 & 0,2882 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2475 \\ 0,8889 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5191 & 0,3816 \end{bmatrix} \\
 w_{ij}(3) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3750 \\ 0 & 0,3333 & 0,4444 \\ 0,1111 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1233 & 0 \end{bmatrix} & w_{ik}(3) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,3125 & 0,3125 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2222 \\ 0,8889 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5479 & 0,3288 \end{bmatrix} \\
 w_{ij}(4) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4030 \\ 0 & 0,2895 & 0,4737 \\ 0,1111 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1096 & 0 \end{bmatrix} & w_{ik}(4) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,2985 & 0,2985 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2368 \\ 0,8889 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5316 & 0,3588 \end{bmatrix} \\
 w_{ij}(5) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3921 \\ 0 & 0,3065 & 0,4624 \\ 0,1111 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1150 & 0 \end{bmatrix} & w_{ik}(5) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,3040 & 0,3040 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2312 \\ 0,8889 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5380 & 0,3470 \end{bmatrix} \\
 w_{ij}(6) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4135 \\ 0 & 0,2732 & 0,4845 \\ 0,1111 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1044 & 0 \end{bmatrix} & w_{ik}(6) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,2933 & 0,2933 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2423 \\ 0,8889 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5253 & 0,3703 \end{bmatrix} \\
 w_{ij}(7) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4236 \\ 0 & 0,2576 & 0,4949 \\ 0,1111 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0993 & 0 \end{bmatrix} & w_{ik}(7) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,2882 & 0,2882 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2475 \\ 0,8889 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5191 & 0,3816 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$w_{ij}(8) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3808 \\ 0 & 0,3242 & 0,4505 \\ 0,1111 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1205 & 0 \end{bmatrix}$$

$$w_{ij}(9) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3377 \\ 0 & 0,3929 & 0,4048 \\ 0,1111 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1408 & 0 \end{bmatrix}$$

$$w_{ij}(10) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4186 \\ 0 & 0,2653 & 0,4898 \\ 0,1111 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1018 & 0 \end{bmatrix}$$

$$w_{ik}(8) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,3096 & 0,3096 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2253 \\ 0,8889 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5446 & 0,3349 \end{bmatrix}$$

$$w_{ik}(9) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,3311 & 0,3311 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2024 \\ 0,8889 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5690 & 0,2902 \end{bmatrix}$$

$$w_{ik}(10) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0,2907 & 0,2907 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2449 \\ 0,8889 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5222 & 0,3760 \end{bmatrix}$$

Appendix D: Analyse van α_i parameters bij kalibratie testscenario

- Theoretische α_i matrix

Tabel 14: theoretische α_i matrix met ratio's

Testscenario	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_5/α_3	α_4/α_2	α_5/α_2
t ₁	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5571	0,6964	4,0000	2,7855
t ₂	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5319	0,6649	4,0000	2,6595
t ₃	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5713	0,7141	4,0000	2,8565
t ₄	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5866	0,7333	4,0000	2,9330
t ₅	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5571	0,6964	4,0000	2,7855

- Kalibratie α_{ij} en α_{ik} : α_i analyse voor drie oplossingen

Tabel 15: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} en α_{ik} op testscenario (1)

Oplossing 1	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_5/α_3	α_4/α_2	α_5/α_2
t ₁	0,4675	0,1937	0,7763	0,7747	0,5407	0,6964	4,0000	2,7916
t ₂	0,4675	0,1937	0,7784	0,7747	0,5182	0,6657	4,0000	2,6757
t ₃	0,4675	0,1937	0,7749	0,7747	0,5532	0,7139	4,0000	2,8564
t ₄	0,4675	0,1937	0,7730	0,7747	0,5668	0,7332	4,0000	2,9266
t ₅	0,4675	0,1937	0,7763	0,7747	0,5407	0,6964	4,0000	2,7916

Tabel 16: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} en α_{ik} op testscenario (2)

Oplossing 2	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_5/α_3	α_4/α_2	α_5/α_2
t ₁	0,3619	0,1962	0,7857	0,7847	0,5472	0,6964	4,0000	2,7892
t ₂	0,3619	0,1962	0,7869	0,7847	0,5236	0,6654	4,0000	2,6691
t ₃	0,3619	0,1962	0,7848	0,7847	0,5603	0,7140	4,0000	2,8564
t ₄	0,3619	0,1962	0,7837	0,7847	0,5746	0,7332	4,0000	2,9292
t ₅	0,3619	0,1962	0,7857	0,7847	0,5472	0,6964	4,0000	2,7892

Tabel 17: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} en α_{ik} op testscenario (3)

Oplossing 3	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_5/α_3	α_4/α_2	α_5/α_2
t ₁	0,4667	0,1937	0,7764	0,7748	0,5407	0,6964	4,0000	2,7916
t ₂	0,4667	0,1937	0,7784	0,7748	0,5182	0,6657	4,0000	2,6756
t ₃	0,4667	0,1937	0,7750	0,7748	0,5533	0,7139	4,0000	2,8564
t ₄	0,4667	0,1937	0,7731	0,7748	0,5669	0,7332	4,0000	2,9267
t ₅	0,4667	0,1937	0,7764	0,7748	0,5407	0,6964	4,0000	2,7916

- Kalibratie α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} : α_i analyse voor drie oplossingen

Tabel 18: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op testscenario (1)

Oplossing 1	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_5/α_3	α_4/α_2	α_5/α_2
t ₁	0,3184	0,1972	0,7895	0,7888	0,5498	0,6964	4,0000	2,7883
t ₂	0,3184	0,1972	0,7904	0,7888	0,5258	0,6652	4,0000	2,6664
t ₃	0,3184	0,1972	0,7889	0,7888	0,5633	0,7140	4,0000	2,8564
t ₄	0,3184	0,1972	0,7881	0,7888	0,5778	0,7332	4,0000	2,9302
t ₅	0,3184	0,1972	0,7895	0,7888	0,5498	0,6964	4,0000	2,7883

Tabel 19: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op testscenario (2)

Oplossing 2	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_5/α_3	α_4/α_2	α_5/α_2
t ₁	0,2619	0,1985	0,7945	0,7941	0,5533	0,6964	4,0000	2,7870
t ₂	0,2619	0,1985	0,7950	0,7941	0,5287	0,6650	4,0000	2,6630
t ₃	0,2619	0,1985	0,7942	0,7941	0,5671	0,7141	4,0000	2,8564
t ₄	0,2619	0,1985	0,7938	0,7941	0,5820	0,7332	4,0000	2,9316
t ₅	0,2619	0,1985	0,7945	0,7941	0,5533	0,6964	4,0000	2,7870

Tabel 20: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op testscenario (3)

Oplossing 3	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_5/α_3	α_4/α_2	α_5/α_2
t ₁	0,4436	0,1942	0,7784	0,7770	0,5421	0,6964	4,0000	2,7910
t ₂	0,4436	0,1942	0,7803	0,7770	0,5194	0,6657	4,0000	2,6741
t ₃	0,4436	0,1942	0,7771	0,7770	0,5548	0,7139	4,0000	2,8564
t ₄	0,4436	0,1942	0,7754	0,7770	0,5686	0,7332	4,0000	2,9272
t ₅	0,4436	0,1942	0,7784	0,7770	0,5421	0,6964	4,0000	2,7910

- Kalibratie w_{ij} en w_{ik} : α_i analyse voor drie oplossingen

Tabel 21: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} en w_{ik} op testscenario (1)

Oplossing 1	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_5/α_3	α_4/α_2	α_5/α_2
t_1	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,4000	0,5000	4,0000	2,0001
t_2	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,4000	0,5000	4,0000	2,0000
t_3	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5713	0,7141	4,0000	2,8564
t_4	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5866	0,7332	4,0000	2,9330
t_5	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5571	0,6964	4,0000	2,7857

Tabel 22: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} en w_{ik} op testscenario (2)

Oplossing 2	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_5/α_3	α_4/α_2	α_5/α_2
t_1	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5851	0,7314	4,0000	2,9255
t_2	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,4004	0,5005	4,0000	2,0022
t_3	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5713	0,7141	4,0000	2,8564
t_4	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5866	0,7332	4,0000	2,9330
t_5	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5571	0,6964	4,0000	2,7857

Tabel 23: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} en w_{ik} op testscenario (3)

Oplossing 3	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_5/α_3	α_4/α_2	α_5/α_2
t_1	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,4000	0,5000	4,0000	2,0000
t_2	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,4000	0,5000	4,0000	2,0000
t_3	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5713	0,7141	4,0000	2,8564
t_4	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5866	0,7332	4,0000	2,9330
t_5	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5571	0,6964	4,0000	2,7857

- Kalibratie w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} : α_i analyse voor drie oplossingen

Tabel 24: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op testscenario (1)

Oplossing 1	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_5/α_3	α_4/α_2	α_5/α_2
t_1	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,3995	0,4993	4,0000	1,9973
t_2	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,3999	0,4998	4,0000	1,9993
t_3	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5713	0,7141	4,0000	2,8564
t_4	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5866	0,7332	4,0000	2,9330
t_5	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5571	0,6964	4,0000	2,7857

Tabel 25: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op testscenario (2)

Oplossing 2	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_5/α_3	α_4/α_2	α_5/α_2
t_1	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,4000	0,5000	4,0000	2,0000
t_2	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,4000	0,5000	4,0000	2,0000
t_3	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5713	0,7141	4,0000	2,8564
t_4	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5866	0,7332	4,0000	2,9330
t_5	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5571	0,6964	4,0000	2,7857

Tabel 26: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op testscenario (3)

Oplossing 3	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_5/α_3	α_4/α_2	α_5/α_2
t_1	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,4000	0,5000	4,0000	2,0001
t_2	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,3997	0,4996	4,0000	1,9985
t_3	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5713	0,7141	4,0000	2,8564
t_4	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5866	0,7332	4,0000	2,9330
t_5	0,2000	0,2000	0,8000	0,8000	0,5571	0,6964	4,0000	2,7857

Appendix E: Analyse van α_i parameters bij kalibratie metingen

- Kalibratie α_{ij} en α_{ik} : α_i analyse voor drie oplossingen

Tabel 27: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} en α_{ik} op metingen (1)

Oplossing 1	α_3	α_5	α_5/α_3	Bovengrens α_5/α_3
t ₁	0,6646	0,2779	0,4182	-
t ₂	0,6643	0,2788	0,4197	0,5590
t ₃	0,6639	0,2801	0,4219	0,6200
t ₄	0,6641	0,2793	0,4206	0,5599
t ₅	0,6640	0,2796	0,4211	0,4193
t ₆	0,6642	0,2791	0,4202	1,0449
t ₇	0,6643	0,2788	0,4197	-
t ₈	0,6639	0,2799	0,4216	0,5171
t ₉	0,6635	0,2810	0,4235	0,4040
t ₁₀	0,6643	0,2789	0,4199	-

Tabel 28: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} en α_{ik} op metingen (2)

Oplossing 2	α_3	α_5	α_5/α_3	Bovengrens α_5/α_3
t ₁	0,6839	0,2814	0,4114	-
t ₂	0,6799	0,2831	0,4164	0,5590
t ₃	0,6740	0,2856	0,4237	0,6200
t ₄	0,6774	0,2842	0,4195	0,5599
t ₅	0,6761	0,2847	0,4211	0,4193
t ₆	0,6787	0,2836	0,4179	1,0449
t ₇	0,6799	0,2831	0,4164	-
t ₈	0,6747	0,2853	0,4228	0,5171
t ₉	0,6693	0,2874	0,4293	0,4040
t ₁₀	0,6793	0,2834	0,4171	-

Tabel 29: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} en α_{ik} op metingen (3)

Oplossing 3	α_3	α_5	α_5/α_3	Bovengrens α_5/α_3
t_1	0,7631	0,3577	0,4688	-
t_2	0,7694	0,3416	0,4439	0,5590
t_3	0,7791	0,3188	0,4091	0,6200
t_4	0,7735	0,3317	0,4289	0,5599
t_5	0,7757	0,3266	0,4211	0,4193
t_6	0,7714	0,3367	0,4365	1,0449
t_7	0,7694	0,3416	0,4439	-
t_8	0,7779	0,3214	0,4132	0,5171
t_9	0,7867	0,3021	0,3840	0,4040
t_{10}	0,7704	0,3392	0,4402	-

- Kalibratie α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} : α_i analyse voor drie oplossingen

Tabel 30: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op metingen (1)

Oplossing 1	α_3	α_5	α_5/α_3	Bovengrens α_5/α_3
t_1	0,6611	0,0934	0,1413	-
t_2	0,6649	0,0906	0,1362	0,5590
t_3	0,6713	0,0864	0,1287	0,6200
t_4	0,6675	0,0888	0,1330	0,5599
t_5	0,6689	0,0878	0,1313	0,4193
t_6	0,6661	0,0897	0,1346	1,0449
t_7	0,6649	0,0906	0,1362	-
t_8	0,6705	0,0869	0,1296	0,5171
t_9	0,6768	0,0832	0,1229	0,4040
t_{10}	0,6655	0,0901	0,1354	-

Tabel 31: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op metingen (2)

Oplossing 2	α_3	α_5	α_5/α_3	Bovengrens α_5/α_3
t_1	0,9008	0,0738	0,0820	-
t_2	0,8962	0,0794	0,0886	0,5590
t_3	0,8885	0,0886	0,0997	0,6200
t_4	0,8930	0,0832	0,0932	0,5599
t_5	0,8913	0,0853	0,0956	0,4193
t_6	0,8947	0,0813	0,0908	1,0449
t_7	0,8962	0,0794	0,0886	-
t_8	0,8895	0,0875	0,0983	0,5171
t_9	0,8817	0,0965	0,1094	0,4040
t_{10}	0,8954	0,0803	0,0897	-

Tabel 32: α_i analyse voor kalibratie van α_{ij} , α_{ik} en t_{ik} op metingen (3)

Oplossing 3	α_3	α_5	α_5/α_3	Bovengrens α_5/α_3
t_1	0,6805	0,2452	0,3604	-
t_2	0,6763	0,2460	0,3638	0,5590
t_3	0,6694	0,2472	0,3693	0,6200
t_4	0,6735	0,2466	0,3661	0,5599
t_5	0,6719	0,2468	0,3673	0,4193
t_6	0,6749	0,2463	0,3649	1,0449
t_7	0,6763	0,2460	0,3638	-
t_8	0,6703	0,2471	0,3687	0,5171
t_9	0,6633	0,2481	0,3741	0,4040
t_{10}	0,6756	0,2462	0,3644	-

- Kalibratie w_{ij} en w_{ik} : α_i analyse voor drie oplossingen

Tabel 33: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} en w_{ik} op metingen (1)

Oplossing 1	α_3	α_5	α_5/α_3	Bovengrens α_5/α_3
t_1	0,8000	0,3556	0,4445	-
t_2	0,8000	0,3169	0,3961	0,5590
t_3	0,8000	0,3013	0,3766	0,6200
t_4	0,8000	0,4172	0,5215	0,5599
t_5	0,8000	0,3369	0,4211	0,4193
t_6	0,8000	0,3215	0,4019	1,0449
t_7	0,8000	0,3378	0,4222	-
t_8	0,8000	0,3183	0,3979	0,5171
t_9	0,8000	0,3095	0,3869	0,4040
t_{10}	0,8000	0,3593	0,4492	-

Tabel 34: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} en w_{ik} op metingen (2)

Oplossing 2	α_3	α_5	α_5/α_3	Bovengrens α_5/α_3
t_1	0,8000	0,3935	0,4918	-
t_2	0,8000	0,3222	0,4028	0,5590
t_3	0,8000	0,3320	0,4150	0,6200
t_4	0,8000	0,3959	0,4949	0,5599
t_5	0,8000	0,3369	0,4211	0,4193
t_6	0,8000	0,3995	0,4994	1,0449
t_7	0,8000	0,4032	0,5041	-
t_8	0,8000	0,3702	0,4627	0,5171
t_9	0,8000	0,2492	0,3115	0,4040
t_{10}	0,8000	0,3375	0,4218	-

Tabel 35: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} en w_{ik} op metingen (3)

Oplossing 3	α_3	α_5	α_5/α_3	Bovengrens α_5/α_3
t_1	0,8000	0,4010	0,5013	-
t_2	0,8000	0,3307	0,4134	0,5590
t_3	0,8000	0,3303	0,4129	0,6200
t_4	0,8000	0,4001	0,5002	0,5599
t_5	0,8000	0,3367	0,4208	0,4193
t_6	0,8000	0,3999	0,4999	1,0449
t_7	0,8000	0,4007	0,5009	-
t_8	0,8000	0,4002	0,5002	0,5171
t_9	0,8000	0,3338	0,4172	0,4040
t_{10}	0,8000	0,3876	0,4845	-

- Kalibratie w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} : α_i analyse voor drie oplossingen

Tabel 36: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op metingen (1)

Oplossing 1	α_3	α_5	α_5/α_3	Bovengrens α_5/α_3
t_1	0,8000	0,3912	0,4890	-
t_2	0,8000	0,3570	0,4463	0,5590
t_3	0,8000	0,2715	0,3393	0,6200
t_4	0,8000	0,4419	0,5524	0,5599
t_5	0,8000	0,2736	0,3420	0,4193
t_6	0,8000	0,4135	0,5168	1,0449
t_7	0,8000	0,4669	0,5836	-
t_8	0,8000	0,3507	0,4384	0,5171
t_9	0,8000	0,3292	0,4115	0,4040
t_{10}	0,8000	0,2688	0,3360	-

Tabel 37: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op metingen (2)

Oplossing 2	α_3	α_5	α_5/α_3	Bovengrens α_5/α_3
t_1	0,8000	0,3390	0,4238	-
t_2	0,8000	0,4001	0,5002	0,5590
t_3	0,8000	0,3427	0,4284	0,6200
t_4	0,8000	0,3524	0,4404	0,5599
t_5	0,8000	0,2449	0,3061	0,4193
t_6	0,8000	0,3781	0,4726	1,0449
t_7	0,8000	0,3376	0,4220	-
t_8	0,8000	0,3660	0,4574	0,5171
t_9	0,8000	0,3507	0,4384	0,4040
t_{10}	0,8000	0,3685	0,4606	-

Tabel 38: α_i analyse voor kalibratie van w_{ij} , w_{ik} en t_{ik} op metingen (3)

Oplossing 3	α_3	α_5	α_5/α_3	Bovengrens α_5/α_3
t_1	0,8000	0,2856	0,3571	-
t_2	0,8000	0,3981	0,4976	0,5590
t_3	0,8000	0,3274	0,4092	0,6200
t_4	0,8000	0,2291	0,2864	0,5599
t_5	0,8000	0,2836	0,3545	0,4193
t_6	0,8000	0,2847	0,3558	1,0449
t_7	0,8000	0,3083	0,3854	-
t_8	0,8000	0,2804	0,3505	0,5171
t_9	0,8000	0,2838	0,3548	0,4040
t_{10}	0,8000	0,3483	0,4353	-

Bibliografie

- [1] R. Corthout, „Intersection modelling and marginal simulation in macroscopic dynamic network loading,” Katholieke Universiteit Leuven, 2012.
- [2] E. Cascetta, „Transportation systems engineering: theory and methods,” Kluwer Academic Publishers, Nederland, 2001.
- [3] T. Durlin en V. Henn, „A delayed flow intersection model for dynamic traffic assignment,” *Advanced OR and AI Methods in Transportation*, pp. 441-449, 2005.
- [4] I. Yperman, „The Link Transmission Model for Dynamic Network Loading,” Katholieke Universiteit Leuven, 2007.
- [5] W. Brilon en N. Wu, „Capacity at unsignalized intersections derived by conflict technique,” *Transportation Research Record 1776*, pp. 82-90, 2001.
- [6] N. Wu, „Determination of Capacity at All-Way Stop-Controlled Intersections,” *Transportation Research Record 1710*, pp. 205-214, 2000.
- [7] W. Brilon en T. Miltner, „Capacity at intersections without traffic signals,” *Transportation Research Record 1920*, pp. 32-40, 2005.
- [8] U.S. Department of transportation, Traffic signal timing manual, 2008.