

Realtime optimalisatie van VRI's in een verkeersnetwerk

Hugo de Jong

11 april 2014



Een verkennend onderzoek naar de mogelijkheden om verkeersregelininstallaties in een netwerk geautomatiseerd te laten reageren op veranderingen in het verkeersbeeld zonder hierbij infrastructurele aanpassingen te vereisen.

1 Dankwoord

In het begin van mijn onderzoek was de richting nog erg onduidelijk. Samen met de mensen van IT&T ben ik uiteindelijk gekomen tot een onderwerp dat voor hen nuttig was en voor mij interessant. Ik wil met name Guus van der Burgt (maar ook alle anderen!) bedanken voor het meedenken, de onbetaalbare input en het geduld toen het onderzoek even nergens heen leek te gaan.

In dit proces van richting geven aan het onderzoek heb ik ontzettend veel gehad aan Theo van de Weide. Als een gids in de donkere scriptiejungle heeft hij mij steeds weer teruggebracht naar het pad als ik weer eens languit in de modder lag. Hoe lastig het ook was als ik thuis zat en niet wist hoe verder te gaan, of daar de motivatie niet voor kon opbrengen: elk gesprek met Theo verliet ik met een hernieuwd gevoel van inspiratie en motivatie.

Dan thuis. Zeker in de periode waarin ik het schrijven naast mijn fulltime baan deed en de tijd hiervoor moest vrijmaken, heeft mijn vriendin Esther me altijd gesteund. Soms met de spreekwoordelijke mattenklopper, maar meestal met begrip, een kop thee en zelfgebakken koekjes. Esther, jij hebt altijd geloofd in de voltooiing van dit werk, ook al liet het veel langer op zich wachten dan we beiden hadden gehoopt. Dankjewel ☺

Tot slot nog mijn ouders. Pap en mam, jullie hebben het altijd aan mij gelaten of ik een tweede studie zou gaan doen. Hoewel het allemaal iets langer heeft geduurd dan vooraf gedacht, heb ik nooit spijt gehad van mijn keuze en jullie steun en enthousiasme heeft daar zeker aan bijgedragen.

Veel mensen om mij heen, inclusief ondergetekende, hebben zich lang afgevraagd wanneer deze scriptie zou worden afgerond. Óf dat zou gebeuren is wat mij betreft nooit de vraag geweest, maar ik weet vrij zeker dat anderen daar over hebben getwijfeld. Het plan om het onderzoek en het schrijven af te ronden binnen een half jaar sneuvelde na ongeveer 5 maanden, waarna ik nog steeds goede hoop had om het spoedig af te ronden. Het (achteraf bekeken) uitstekende advies van Theo om het schrijven niet te combineren met een fulltime baan sloeg ik koppig in de wind en voor ik het wist was het 2014. Na ruim anderhalf jaar is het nu toch zover: het dankwoord is geschreven, wat betekent dat dit document spoedig naar de (PDF-)drukker kan.

2 Inhoud

1	Dankwoord	2
3	Introductie en probleemstelling.....	6
4	Context	8
4.1	Maatschappij.....	8
4.1.1	Geschiedenis van verkeer en verkeersmanagement	8
4.1.2	Spanningsveld.....	8
5	Literatuur.....	11
6	Verkeerselementen.....	12
6.1	Kruisingen	12
6.2	Armen	12
6.3	Signaalgroepen.....	13
6.3.1	Conflicten	15
7	Belangrijke concepten.....	16
7.1	Intensiteit	16
7.2	Dichtheid	16
7.3	Fundamenteel diagram	17
7.4	Belastinggraad	19
7.5	Congestie	19
7.6	Overbelasting	19
7.7	Wachtrijen.....	20
7.7.1	Opbouw	20
7.7.2	Afrijden.....	20
7.8	Signaalgroepafwikkeling.....	21
7.9	Netwerken.....	22
7.10	Verkeersbewegingen.....	24
8	Parameteraanpassing.....	26
8.1	Maximumgroentijd.....	26

8.1.1	Effect.....	26
8.1.2	Bestaande methoden	28
8.1.3	Toepassing	29
8.2	Hiaattijd	30
8.3	Modulestructuur	31
9	Intensiteit per signaalgroep voorspellen.....	32
10	Netwerkoptimalisatie	33
10.1	Probleemsignalering.....	33
10.1.1	Pseudocode	34
10.2	Aanpak.....	35
10.2.1	Afvoer verhogen	37
10.2.2	Aanvoer beperken	38
10.2.3	Combinatie	40
10.3	Effect.....	41
11	Prototype.....	42
11.1	Functioneel ontwerp	42
11.1.1	Functionaliteit	42
11.1.2	Datastromen.....	43
11.1.3	Interfaces.....	43
11.1.4	Gegevensstructuur	44
11.2	Technisch ontwerp	46
11.2.1	Architectuur.....	46
11.2.2	Klassendiagram.....	46
11.3	Testen	48
12	Maatschappelijke en menselijke effecten.....	49
12.1	Kosten van vertraging.....	49
12.1.1	Toepassing	51
12.1.2	Voorbeeld	52
12.2	Gemoed van de verkeersdeelnemer	55
12.2.1	Effecten op de gemoedstoestand	55
12.2.2	Consequenties	55
12.3	Samengevat	56

13	Resultaten en conclusie.....	57
14	Verder onderzoek en uitbreiding	59
15	Bijlage A – Bedrijfsbeschrijving IT&T	61
15.1	IT&T	61
15.1.1	Structuur.....	61
15.1.2	Commissies.....	64
15.1.3	Klanten.....	64
16	Literatuur.....	65

3 Introductie en probleemstelling

In 1868 werd in Londen het eerste verkeerslicht in gebruik genomen, nog vóór de eerste auto's op de straten verschenen. Dit verkeerslicht bestond uit een rode en een groene gaslantaarn en werd met de hand bediend door een politieagent. Het eerste elektrische verkeerslicht zag het licht in Salt Lake City in de Verenigde Staten in 1912. In diezelfde stad werd in 1917 het eerste elektrische, gecoördineerde verkeerslicht geïntroduceerd. Slechts zeventien jaar later, in 1934, waren er alleen in New York al 7.700 met verkeerslichten geregelde kruispunten.

In Nederland werden verkeerslichten pas veel later, in 1930, ingevoerd in het verkeersbeeld. Eerst in Eindhoven, en zes jaar later ook in Amsterdam. In de tweede helft van de twintigste eeuw, in 1952, wordt er voor het eerst een analoge computer gebruikt om aan de hand van informatie van een verkeersdetector uit een set regelingen de meest geschikte te kiezen. De eerste versie van de bij ons bekende digitale verkeersregelcomputer deed in 1959 zijn intrede in Toronto en is sindsdien een vertrouwd onderdeel van het verkeersbeeld geworden: in Nederland stonden in 2004 ruim 5400 verkeersregelinstallaties[2].[5]

In de vroege dagen van de verkeersregelingen werden de lichten geregeld door erg eenvoudige elektronica. De volgorde en duur van de groenfasen was vooraf bepaald en er werd weinig gerekend aan de instellingen van zo'n installatie. Deze zogenaamde starre regelingen leverden geen problemen op zolang de verkeersstromen goed te verwerken waren (wat in die dagen meestal zo was), maar bij grotere drukte ontstonden opstoppingen.

Tegenwoordig zijn veel verkeersregelingen in Nederland geen starre maar verkeersafhankelijke regelingen. Dit houdt in dat er rekening wordt gehouden met het verkeersbeeld en dat het lichtenpatroon aan de hand van voertuigregistraties wordt afgestemd op de huidige situatie. Op dit gebied is in de laatste jaren veel winst geboekt en steeds meer wordt er gekeken naar verkeersnetwerkmanagement. Er wordt dan niet gekeken naar de verwerkingscapaciteit van een enkel kruispunt maar juist naar het netwerk waar dit kruispunt deel van uitmaakt. Door verkeersregelingen te koppelen en op elkaar af te stemmen kunnen grote winsten worden geboekt op het gebied van doorstroming, veiligheid en milieuvriendelijkheid. Deze oplossingen zijn echter zonder uitzondering maatwerk en daardoor erg kostbaar en arbeidsintensief voorafgaand aan de invoering ervan.

De toegenomen verkeersdrukke heeft verschillende problemen met zich meegebracht. Zo kunnen veel verkeersnetwerken de verkeersstromen niet aan en neemt hierdoor de reistijd toen en het

reisplezier af. Daarom is het interessant om te zoeken naar een oplossing die deze problemen vermindert (of zelfs wegneemt) en die werkt op bestaande verkeersnetwerken zonder dat daar infrastructurele aanpassingen voor nodig zijn. We gaan op zoek naar het antwoord op de volgende onderzoeksvraag:

Op welke manier kunnen we verkeersregelininstallaties in een netwerk op een gecoördineerde manier aanpassen aan het actuele verkeersbeeld en wat zijn hier de maatschappelijke voordelen van?

Om deze vraag te beantwoorden, moeten we een aantal stappen doorlopen:

1. Contextbeschrijving
2. Literatuuronderzoek
3. Modelleren van relevante verkeerssituaties
4. Ontwerpen van een oplossing
5. Beschrijven van de technische en maatschappelijke impact van de oplossing
6. Prototype ontwerpen

Het resultaat van elk van deze stappen is terug te vinden in dit document.

4 Context

In het veld van verkeersregelingen en verkeersmanagement heeft men te maken met een spanningsveld tussen drie begrippen: veiligheid, prestaties en geloofwaardigheid. Elke maatregel beïnvloedt deze drie facetten in meer of mindere mate en daarom zullen ze alle drie moeten worden overwogen op het moment dat er een ingreep plaatsvindt. IT&T is een bedrijf dat zich bezighoudt met allerlei verkeersmaatregelen en -analyses. In hoofdstuk 0 is een beschrijving te vinden van het bedrijf. Dit is in een bijlage geplaatst vanwege de gevoeligheid van de informatie die dit deel omvat.

4.1 Maatschappij

Buiten het technische gedeelte om, heeft het regelen en sturen van verkeer een maatschappelijke kant. Wegen en verkeer zijn er immers ook ter ondersteuning van maatschappelijke verschijnselen als forenzen, recreatie en vrachtvervoer.

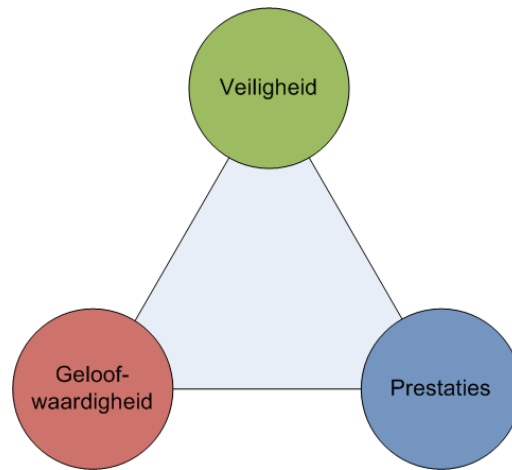
4.1.1 Geschiedenis van verkeer en verkeersmanagement

De Romeinen waren een van de eersten die het belang zagen van een goed functionerend wegennet. Naarmate het oude Rijk groter werd, werd het steeds lastiger om te voorzien in efficiënte communicatie en snel goederen- en troepenvervoer. Vanaf 312 voor Christus legden de Romeinen in opdracht van censor Appius Claudius de Via Appia aan [6], wat het begin was van de bouw van een indrukwekkend wegennetwerk van 400.000 km waarvan 80.500 km verhard was [7]. Dit netwerk werd voornamelijk gebruikt om legers sneller te verplaatsen binnen het rijk, maar ook koeriers en handelaars profiteerden ervan. Sinds die tijd is er natuurlijk veel veranderd, maar een goede infrastructuur is nog altijd van groot belang, zeker voor een land als Nederland waar de wegtransportsector goed is voor een omzet van 17,5 miljard euro [8] en havens als die van Rotterdam en de luchthaven Schiphol in staat stelt grote hoeveelheden vracht te verwerken. Het stelt echter ook andere sectoren in staat om werknemers aan te trekken van buiten hun regio.

4.1.2 Spanningsveld

Een verkeersmaatregel, dus ook het plaatsen of instellen van een verkeerslichtenregeling, wordt gedaan met het oog op een bepaald doel. Meestal is dat het bevorderen van de doorstroming en/of de veiligheid op een kruispunt. Dat zijn dan ook de punten waarop het functioneren van een maatregel wordt getoetst. Er is echter nog een derde dimensie: geloofwaardigheid. Elke maatregel bevindt zich dus in een spanningsveld (zie Figuur 1 - Spanningsveld) van deze drie aspecten [2]. Een kleinere rol wordt gespeeld door vervuiling; er kan ook rekening worden gehouden met bijvoorbeeld geluidsproductie, brandstofverbruik of de uitstoot van uitlaatgassen. Dit valt echter vaak buiten

eerdergenoemde spanningsveld omdat deze factoren vaak bijkomend zijn en geen afweging behoeven ten opzichte van de andere drie aspecten. Steeds vaker wordt dit echter wél meegewogen in de besluitvorming aangaande verkeerssituaties, zeker wanneer het drukke binnensteden betreft.



Figuur 1 - Spanningsveld

4.1.2.1 Veiligheid

In de laatste jaren is het aantal dodelijke slachtoffers sterk afgenomen: van 1251 in 1996 tot 640 in 2010 [9]. Verkeersongevallen zijn echt nog steeds een fikse kostenpost voor de maatschappij: in 2009 lagen die kosten in Nederland op 12,5 miljard euro [10]. Veiligheid is dus een belangrijk aspect van het verkeer en daarmee van verkeerslichtenregelingen. Vaak worden ze geplaatst om kruisende verkeersstromen veilig af te wikkelen en zodoende de veiligheid van de weggebruikers te bevorderen. Een maatregel die in de driehoek in Figuur 1 dicht bij veiligheid ligt is bijvoorbeeld het verruimen van de ontruimingstijden in een verkeersregeling. Dit zorgt ervoor dat er meer tijd is voor voertuigen om het kruisingsvlak over te steken door alle lichten tijdelijk op rood te zetten, maar verlaagt de prestaties door de voor voertuigen benutbare tijd (groen) te verminderen.

4.1.2.2 Prestaties

De efficiëntie van wegtransport en –vervoer hangt voor een groot deel af van de mate waarin verkeersmaatregelen de doorstroming waarborgen en de aanwezigheid van korte routes van herkomst naar bestemming.

De transportsector is op zichzelf al een bron van inkomsten voor de overheid en de maatschappij, maar daar de sector faciliteert ook het vrachtvervoer van en naar de Rotterdamse haven en Schiphol en draagt daarmee bij aan de functie van Nederland als transport- en overslagland. Jaarlijks wordt er door de Nederlandse beroepstransportsector 122 miljoen ton vracht vervoerd van en naar het buitenland. [11]

De kosten van wachttijden door files in Nederland lag in 2011 nog tussen de 750 miljoen en de 1 miljard euro. Dat is ongeveer 25% minder dan het jaar ervoor, maar nog steeds een enorme kostenpost voor de staat en de maatschappij. Deze schade wordt vooral veroorzaakt door productiviteitsverlies. De kosten van een voertuigverliesuur wordt geschat rond de 15 euro, afhankelijk van het reisdoel [12]. Door de winst in verliesuren van een maatregel te berekenen, is het eenvoudig in te zien dat er veel winst is te behalen op het gebied van prestatieverbetering bij verkeersregelinstallaties en verkeersnetwerken.

4.1.2.3 Geloofwaardigheid

Geloofwaardigheid van een verkeersmaatregel kan worden gedefinieerd als de mate waarin de weggebruiker gelooft dat de maatregel een goede invloed heeft op het verkeer [13]. Dit aspect van verkeersregelingen heeft vaak te maken met de twee andere aspecten. Als de geloofwaardigheid daalt, zijn weggebruikers eerder geneigd zich ongehoorzaam op te stellen en verkeersregels te overtreden. Als een weggebruiker erg lang staat te wachten voor een rood licht of hij staat te wachten terwijl er geen kruisende verkeersstromen rijden over het kruisingsvlak, kan hij het idee krijgen dat de regeling zijn voertuig niet heeft opgemerkt of dat de regeling zelf niet goed werkt. Dit kan leiden tot onveilige situaties, zoals een fietser of automobilist die door rood rijdt (roodnegatie).

5 Literatuur

Het eerder voorgestelde vraagstuk, het zonder infrastructurele aanpassingen ingrijpen in een verkeersnetwerk, is niet vaak de revue gepasseerd in literatuur. Er is vanaf de jaren '50 veel onderzoek gedaan naar de optimalisatie van individuele verkeersregelautomaten

In de eerste generatie van regelautomaten werden starre, verkeersonafhankelijke regelingen gebruikt. De instellingen hiervoor werden berekend aan de hand van het werk van Webster in [14]. In een later stadium werden meerdere starre regelprogramma's uitgewerkt die gedurende de dag op vaste tijdstippen al dan niet automatisch werden afgewisseld, om zodoende steeds het programma actief te hebben wat het best aansluit bij het gemiddelde verkeersbeeld op het betreffende tijdstip.

De tweede generatie richtte zich op het verkeersafhankelijk optimaliseren van individuele regelinstallaties. Dit is het soort installaties wat in Nederland momenteel het meest wordt gebruikt wanneer er nieuwe automaten worden geplaatst.

De derde generatie is er een van gecoördineerde netwerkregelingen. Vooral het UTOPIA-SPOT systeem [15] is op een aantal plaatsen in Nederland toegepast en geëvalueerd. Het bleek beter te presteren dan installaties van de tweede generatie: op een druk netwerk van vijf kruispunten in lijn werd een reisduurverkortung van 21% gemeten [5]. Hierbij moet worden aangetekend dat dit geen representatief netwerk genoemd mag worden aangezien de kruispunten zoals gezegd op een lijn lagen.

In [16] heeft R.T. van Katwijk een gedistribueerd agent-systeem ontwikkeld voor het verbeteren van de prestaties van een verkeersnetwerk. In een testomgeving bleek dat zijn systeem bij een realistisch netwerk een verbetering teweeg bracht ten opzichte van het andersoortige oplossingen als starre of individuele verkeersafhankelijke regelingen. Een nadeel van de ontwikkelde oplossing is echter dat het een gedistribueerd systeem is. Dit heeft tot gevolg dat het een aanpassing vereist in alle betrokken verkeersregelinstallaties: ze moeten zowel logica bevatten voor het verwerken van de invoer als infrastructurele aanpassingen voor het faciliteren van de onderlinge communicatie. Dit maakt deze oplossing ongeschikt voor het probleem van dit onderzoek.

6 Verkeerselementen

Verkeer bestaat uit alle verkeersdeelnemers, inclusief fietsers en voetgangers. In dit onderzoek zal vanwege de beperkte toepasbaarheid voor deze groep, niet worden gekeken naar fietsers en voetgangers. We richten ons dus op motorvoertuigen.

6.1 Kruisingen

We definiëren een kruispunt als plaats waar wegen elkaar snijden [17]. Omdat er hier meerdere verkeersstromen bij elkaar komen, zijn er regels nodig om te zorgen dat er geen onveilige situaties ontstaan. Op ongeregelde kruispunten zijn die aanwezig in de vorm van verkeersborden en voorrangregels om te bepalen welk verkeer voor ander verkeer gaat. Als kruispunten drukker worden, als er behoefte is aan sturing van de verkeersstromen of als de verkeersveiligheid in het gedrang is, worden er vaak verkeerslichten geplaatst. We spreken dan van een geregelde kruising en dit zal het type kruising zijn waar in de rest van deze scriptie over wordt gesproken.

6.2 Armen

Omdat op een kruispunt per definitie twee of meer wegen samenkomen, zijn er op een dergelijk punt verschillen armen (of takken) te onderscheiden. Verkeer dat het kruisingsvlak wil oversteken zal van de ene arm naar de andere rijden (uitgezonderd kerend verkeer).

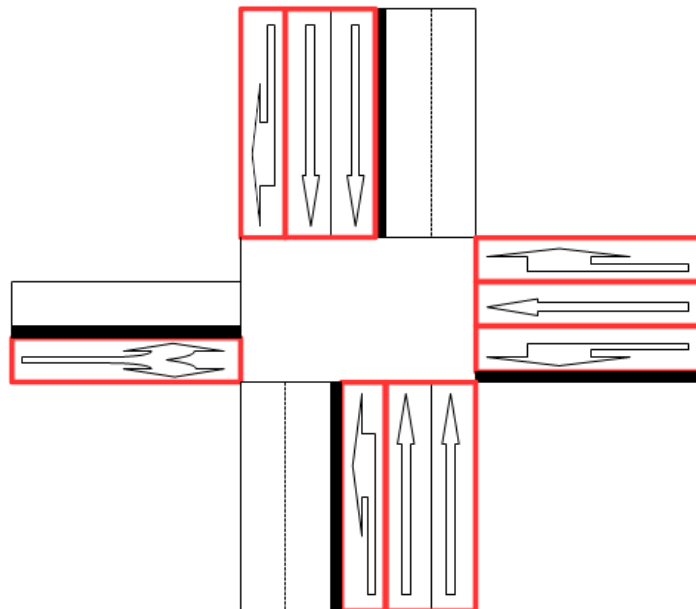
Een kruispunt K is een verzameling aanvoerende armen A_a en een verzameling afvoerende armen A_u .

$$K = (A_a, A_u)$$

Hierbij geldt dat $|A_a| > 1$ en $A_u \neq \emptyset$.

6.3 Signaalgroepen

Op een aanvoerende arm (d.w.z. de arm wordt door verkeer gebruikt om het kruisingsvlak te bereiken) van een geregelde kruising bevinden zich altijd één of meer signaalgroepen. Dit zijn verzamelingen van één of meer verkeerslantaarns die altijd tegelijkertijd hun fasecyclus doorlopen. Een arm die slechts een afvoerend functie heeft, bevat uiteraard geen signaalgroepen. In Figuur 2 zijn de (tien) verschillende signaalgroepen op een kruising aangegeven. Hier is te zien dat een signaalgroep meerdere rijstroken kan beslaan, maar ook een enkele rijstrook die verkeer naar meerdere armen kan laten afrijden. Signaalgroepen worden ook wel richtingen genoemd. Een arm A is een verzameling van signaalgroepen.



Figuur 2 - Voorbeeld signaalgroepen

Een signaalgroep s is een tuple van een aanvoerende arm s_a en een verzameling van afvoerende armen s_U :

$$s = (s_a, s_U)$$

De verzameling van afvoerende armen s_U zal alleen meer dan één element bevatten indien het een samengestelde signaalgroep betreft. Dat wil zeggen dat het verkeer van die signaalgroep kan afrijden naar meerdere armen. Is dat het geval voor een signaalgroep s , dan geldt $|s_U| > 1$. Omdat er op afvoerende armen meestal geen detectie aanwezig is, is de verkeersverdeling over die armen slechts te schatten aan de hand van handmatige verkeersstellingen of afleidingen van gegevens afkomstig van andere verkeersregelingen. Deze verdeling zal waarschijnlijk op verschillende tijdstippen steeds

anders zijn. Denk bijvoorbeeld aan het verschil tussen de ochtendspits en de avondspits. We noteren het deel van het verkeer van signaalgroep s wat afrijdt naar arm a op tijdstip t als volgt:

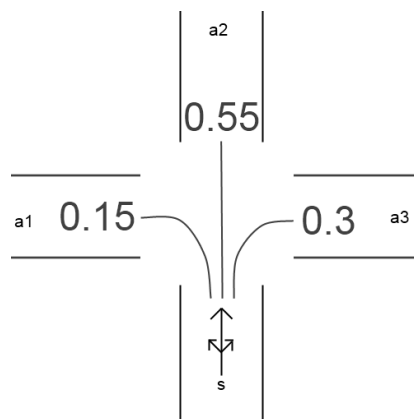
$$vv(s, a, t)$$

Hierbij moet worden opgemerkt dat:

$$0 \leq vv(s, a, t) \leq 1$$

En:

$$\sum_{\forall a \in S_U} vv(s, a, t) = 1$$



Figuur 4 - Voorbeeld verkeersverdeling

In Figuur 4 is een voorbeeld gegeven van een verkeersverdeling van een signaalgroep s die verkeer afwikkelt naar drie armen $a1$, $a2$ en $a3$. Hier is te zien dat 55% van het verkeer rechtdoor rijdt,, 30% rechtsaf slaat en 15% linksaf slaat. In dit geval geldt dus:

$$vv(s, a1, t) = 0,15$$

$$vv(s, a2, t) = 0,55$$

$$vv(s, a3, t) = 0,3$$

Het verkeer dat komt aanrijden op een bepaalde arm kan vaak voorsorteren voor één van een aantal signaalgroepen dat zich op die arm bevindt. Omdat we straks een voorspelling willen gaan doen van het aantal voertuigen dat een signaalgroep te verwerken krijgt, is het belangrijk om te weten hoe het aanrijdende verkeer zich verdeelt over de signaalgroepen. Dit kan eenvoudig worden gemeten met detectoren die bij de stopstreep van elke rijstrook liggen. We drukken dit uit als $vs(s, t)$, waar $0 \geq vs(s, t) \geq 1$.

6.3.1 Conflicten

De belangrijkste veiligheidseis voor een verkeerslichtenregeling is vastgelegd in de conflictmatrix [2]. Hierin staat gespecificeerd welke richtingen niet tegelijkertijd groen en/of geel mogen hebben. Dit zijn dan conflicterende richtingen. In deze matrix is ook vastgelegd hoeveel tijd er tussen de geelfase van de ene, en de groenfase van de andere richting zit. Deze duur is gebaseerd op de tijd die voertuigen van nodig hebben om het kruispunt te ontruimen en wordt dan ook de ontruimingstijd genoemd. Deze conflictmatrix beschouwen we al gegeven en zal verder niet worden meegenomen in de probleemstelling of de oplossing.

We definiëren een conflictpredicaat cf :



Figuur 5 - Deelconflict

$$cf \subseteq S \times S \quad cf(s_1, s_2) \Leftrightarrow s_1 \text{ en } s_2 \text{ conflicteren}$$

Als het verkeer van een richting komt die niet met een pijllicht (verkeerslantaarn met pijlsjabloon) wordt geregeld, kan het voorkomen dat het ander verkeer kruist. Het conflict tussen deze twee richtingen wordt dan een deelconflict genoemd. Het kan voorkomen dat dit niet als conflict wordt beschouwd en dat bijvoorbeeld linksafslaand verkeer moet wachten op tegemoetkomend rechtdoorgaand verkeer. We beschouwen deze richtingen dan als niet-conflicterend: ze kunnen immers tegelijkertijd groen krijgen zonder dat er een gevaarlijke situatie ontstaat.

7 Belangrijke concepten

Om verkeer te kunnen meten of te modelleren, is het belangrijk om te weten welke grootheden een rol spelen. De belangrijkste grootheden worden hier gedefinieerd en beschreven.

7.1 Intensiteit

De hoeveelheid verkeer die gedurende een bepaalde tijd wordt waargenomen door een detectieapparatuur heet de intensiteit (ook wel flux). Omdat detectoren meestal geen onderscheid kunnen maken tussen verschillende soorten voertuigen wordt dit gemeten in motorvoertuigen (mvt) per uur. Aan de hand van informatie van andere detectoren en andere data kan dit onderscheid wél worden gemaakt en wordt de intensiteit omgezet van mvt per uur naar personenauto-eenheden. Een groter voertuig (bijvoorbeeld een vrachtwagen) telt hierin zwaarder dan een personenauto. De intensiteit van signaalgroep s tussen tijdstip t_0 en t_1 (gemeten in pae) noteren we als $Q(s, t_0, t_1)$. De hoeveelheid verkeer, gemeten in pae, op een weg w op tijdstip t noteren we als $V(w, t)$.

fiets	0,3 pae
motorfiets	0,75 pae
bestelauto/personenauto	1 pae
andere vrachtauto	2 pae of meer
autobus	3 pae

Tabel 1 – pae-waarden bij intensiteitsberekening

In Tabel 1 is te zien welke waarden vaak worden gebruikt bij pae-berekeningen [18].

7.2 Dichtheid

De dichtheid c van verkeer geeft aan hoeveel pae $V(w, t)$ zich over de lengte $l(w)$ van een weg w bevinden.

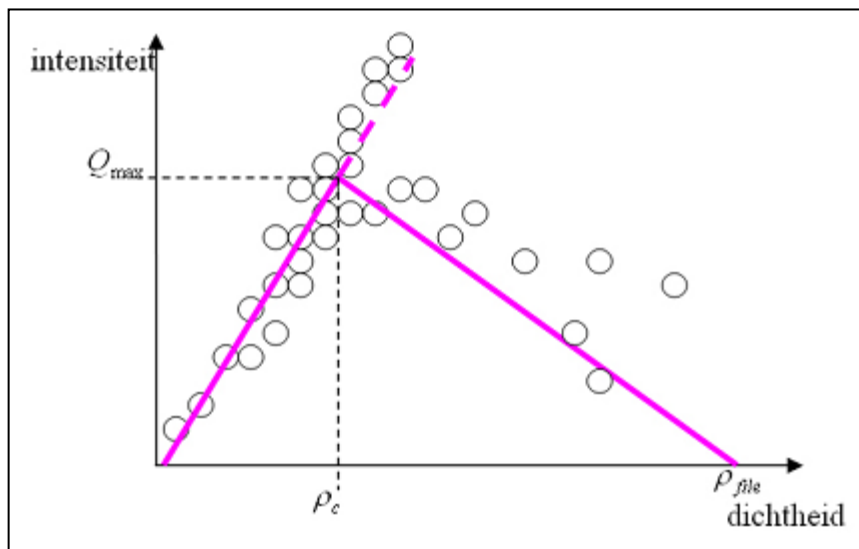
$$c(w, t) = \frac{V(w, t)}{l(w)}$$

Aan de hand van de snelheid $v(p, t)$ en de intensiteit $Q(p, t, t + dt)$ op een punt p kan de dichtheid worden bepaald van het verkeer dat p passeert tussen tijdstippen t en $t + dt$:

$$c(p, t) = \frac{Q(p, t, t + dt)/dt}{v(p, t)}$$

7.3 Fundamenteel diagram

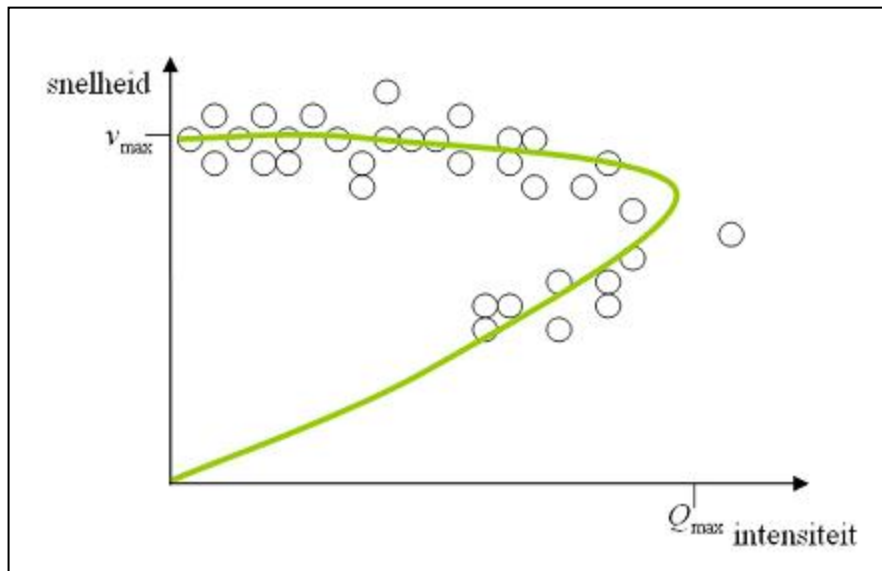
Nu we intensiteit, dichtheid en snelheid hebben beschouwd, is het interessant om te weten hoe deze grootheden elkaar beïnvloeden op de weg. Ze kunnen tegen elkaar uit worden gezet in zogenaamde fundamenteel diagrammen, dat steeds twee van deze grootheden tegen elkaar uitzet en meestal metingen en een trendlijn laat zien. Het geeft een weergave van empirische data en laat daarmee een statistisch verband zien. Voorbeelden hiervan zijn hieronder te zien.



Figuur 6 – Intensiteit/dichtheiddiagram

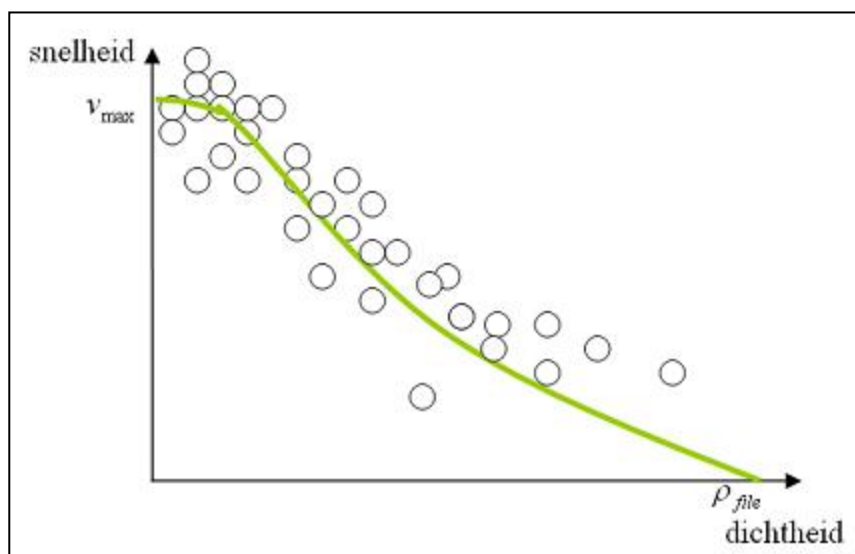
Hierboven is te zien dat zowel het intensiteit/dichtheid-diagram als het snelheid/intensiteit-diagram een opmerkelijk verschijnsel laat zien. Bij het eerstgenoemde diagram kan bij verhoging van de dichtheid de intensiteit stijgen (tot een bepaalde dichtheid) of juist dalen. Als de dichtheid hoger wordt maar ook de intensiteit lineair blijft toenemen, kunnen we aan de hand de eerder aangehaalde dichtheidsvergelijkingen concluderen dat de snelheid nog gelijk blijft. In het diagram is echter ook waar te nemen dat bij een zelfde stijging in dichtheid de intensiteit soms daalt. Dit wordt veroorzaakt door de afnemende snelheid waarmee het verkeer zich voortbeweegt.

Eenzelfde fenomeen is waar te nemen in het snelheid/intensiteit-diagram. Boven een zekere waarde voor de intensiteit (richting de maximumintensiteit) worden er twee groepen waarnemingen gedaan: één met een snelheid die aansluit bij die van een lagere intensiteit en één waarbij de snelheid significant lager ligt. Blijkbaar is het bij een hoge intensiteit niet altijd mogelijk of veilig om de maximumsnelheid te blijven rijden en ligt de gemiddelde snelheid soms lager.



Figuur 8 – Snelheid/intensiteitdiagram

Het snelheid/dichtheid-diagram in (Figuur 7) toont een beeld wat te verwachten is na het zien van de vorige twee: bij een toenemende dichtheid neemt de snelheid af. Tot een zekere dichtheid blijft de snelheid constant rond de maximumsnelheid, maar bij een hogere dichtheid neemt de snelheid af tot 0 bij een bumper-aan-bumpersituatie. Aan de hand van de dichtheid kunnen we dus een benadering doen van de gereden snelheid op een zeker wegdeel. Omdat de exacte waarden sterk afhangen van



Figuur 7 – Snelheid/dichtheiddiagram

een veelheid aan factoren als weginrichting, weersomstandigheden en het tijdstip moet dit verband per wegdeel worden bepaald of moet er worden uitgegaan van een waarde die representatief is voor gelijkende wegdelen.

7.4 Belastinggraad

De belastinggraad van een signaalgroep geeft aan hoeveel van de verkeerverwerkingscapaciteit wordt benut door het verkeer:

$$bg(s, t) = \frac{C(s, t)}{Q(s, t, t + dt)/dt}$$

Als de belastinggraad hoger ligt dan 1 is er sprake van overbelasting. In de praktijk treedt dit verschijnsel eerder op omdat de capaciteit slechts een theoretisch gegeven is. In de praktijk is er in het verkeer geen perfecte verkeersafwikkeling en zal de capaciteit dus iets lager liggen. Let op: deze $C(s, t)$ geeft de capaciteit van signaalgroep s op tijdstip t weer en verschilt dus van de dichtheidfunctie.

7.5 Congestie

Zoals we eerder hebben gezien in paragraaf 0 kan een te hoge verkeersbelasting van een link tussen twee kruispunten ervoor zorgen dat de snelheid op die link lager ligt dan bij een lagere belasting. Omdat we voorspellingen willen doen over onder meer de reistijd voor verkeer tussen twee kruispunten, moeten we dit in ogenschouw nemen. In het algemeen kan gezegd worden dat een dergelijke situatie zelden zal voorkomen omdat een kruispunt aan één kant van de link in principe nooit zo snel verkeer kan afwickelen dat het de capaciteit van de link overstijgt. Dit ligt anders indien er een ritsvak bestaat op de link waar het aantal rijstroken afneemt maar de hoeveelheid verkeer gelijk blijft.

In het geval van een ritsvak kunnen we aan de hand van de eerder beschreven fundamenteel diagrammen de aanname doen dat bij een hoge belasting de snelheid daalt door een sterke toename van de verkeersdichtheid (zie ook Figuur 7 – Snelheid/dichtheiddiagram). Deze aanname is ook bewezen en gekwantificeerd in [19]. Omdat het onderzoek naar ritsvakken en de precieze invloed ervan op de reistijd op een wegvak buiten de scope van dit onderzoek valt, zullen we altijd uitgaan van links zonder ritsvakken.

7.6 Overbelasting

In algemene zin kunnen we zeggen dat er een overbelastingssituatie ontstaat op het moment dat het verkeersaanbod de verwerkingscapaciteit van de richting overstijgt. We zien dan dat de wachtrij voor de stopstreep van een richting niet volledig is afgewikkeld als de groenfase is afgelopen. De achterste voertuigen in de rij zullen dus minimaal tot de volgende groenfase moeten wachten voor ze de wachtrij kunnen verlaten. We spreken dan van een dubbele stop. Omdat de wachttijd sterk oploopt

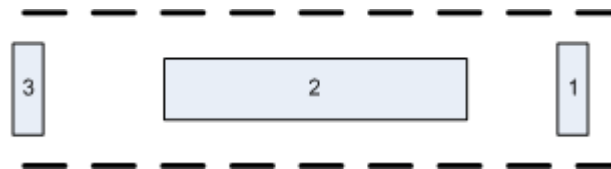
bij een dubbele stop (er moet immers een volledige cyclus worden gewacht) is dit een situatie die we willen voorkomen.

7.7 Wachtrijen

Tussen de groenfasen van een signaalgroep zal er bij verkeersaanbod (en gehoorzaamheid aan het rode licht) een wachtrij ontstaan voor de stopstreep. Idealiter wordt de hele wachtrij afgewikkeld bij de volgende groenfase. Als dat niet het geval is, is er sprake van overbelasting (zie ook 7.6).

7.7.1 Opbouw

De opbouw van een wachtrij in het wegverkeer hangt sterk samen met het aankomstpatroon van de voertuigen. Een gemiddelde van bijvoorbeeld één voertuig per vijf seconden wil niet zeggen dat er elke vijf seconden precies één auto aanrijdt. Omdat bestuurders vaak pelotons vormen achter



Figuur 9 - Detectie op een rijstrook

langzamere voertuigen, sluiten er vaak meerdere voertuigen binnen korte tijd aan bij de al dan niet reeds gevormde wachtrij. De gemiddelde aansluitsnelheid van een peloton voertuigen bij een wachtrij ligt in de praktijk meestal rond de twee seconden per voertuig.

De actuele lengte van een wachtrij kan vrij nauwkeurig worden bepaald aan de hand van de detectieapparatuur die vaak aanwezig is op een rijstrook. In Figuur 9 is een gebruikelijke plaatsing van detectoren te zien. Er is dan een korte detector aanwezig bij de stopstreep (1, de zogenaamde koplus), een lange detector daarachter (2, lange lus) en op afstand nog een korte detector (3, verre lus). De exacte plaatsing van en de verhoudingen tussen de detectoren sluit aan bij de weginrichting, de geldende maximumsnelheid en de voorkeuren van de wegbeheerder en kan dus per situatie sterk verschillen. Uit onderzoek in [20] blijkt het echter ook goed mogelijk te zijn om wachtrijlengte bepaling te doen met één detector, mits die goed geplaatst is

7.7.2 Afrijden

Het afrijden van een wachtrij gebeurt volgens [2] in twee fasen. In de eerste fase reageren bestuurders vooral op het verschijnende groene licht en moeten de voertuigen optrekken vanuit stilstand. Hier is dan sprake van de invloed van optrekverlies en reactietijd van bestuurders op de afrijcapaciteit. De volgtijd tussen twee voertuigen neemt hier af naarmate er meer voertuigen de stopstreep passeren. De tijd die tussen startgroen en het passeren van de stopstreep door het eerste voertuig wordt het optrekverlies (t_b) genoemd. De waarde van t_b hangt volgens [21] sterk af van de

verkeerssituatie: voor rechtdoorgaande stroken is dit circa 3 seconden, terwijl het voor afslaande rijstroken kan oplopen tot 5 seconden. Het aantal voertuigen dat vertrekt in deze eerste fase van het afrijproces waarbij sprake is van optrekverliezen varieert tussen de 3 en 8.

In de tweede fase is er sprake van constante stroom. De volgtijd tussen de voertuigen is gelijk en er is geen sprake meer van optrekverlies omdat de bestuurders aansluiten bij hun voorganger voor ze de stopstreep passeren.

7.8 Signaalgroepafwikkeling

Zoals gezegd kunnen signaalgroepen en bijbehorende verkeerslichten schakelen tussen rood, groen en geel. In de regelapplicatie wordt er echter onderscheid gemaakt tussen meer fasen. Welke fasen dit zijn, hangt af van het soort applicatie. In Nederland zijn er twee bepalende standaarden: de RWS-regelmethode die vooral door Rijkswaterstaat wordt gehanteerd en de CCOL-methode die wordt gebruikt door de andere wegbeheerders. We zullen hier uitgaan van CCOL omdat dit de meest gebruikte standaard is en het de meest begrijpelijke en minst complexe van de twee is. Zoals te zien is in Figuur 10 – Interne signaalgroepafwikkeling, bestaan de externe fasen rood, groen en geel uit respectievelijk twee, vijf en één interne fase.



Figuur 10 – Interne signaalgroepafwikkeling [2]

De rood-voor-aanvraagfase is de eerste fase na de groen- en geelfase. Totdat er in de regelapplicatie is bepaald dat deze signaalgroep weer aan de beurt is voor een groenfase, zal deze fase actief blijven. Op het moment dat de regelapplicatie aankondigt dat de betreffende signaalgroep de volgende is die

groen kan krijgen én daarvoor aan de beurt is, vindt er een overgang plaats naar de rood-na-aanvraagfase.

De eerste groenfase, voorstartgroen, wordt alleen in speciale gevallen gebruikt en speelt hier geen rol van betekenis. Het vastgroen is wél belangrijk: het zorgt ervoor dat het verkeer tussen de stopstreep en de hiaatdetector altijd kan afrijden en dus niet nogmaals voor een rood licht komt te staan. Als dit niet zou gebeuren, zou dat de geloofwaardigheid van de regeling negatief beïnvloeden. Hoe lang deze fase moet duren is dus afhankelijk van de afstand tussen de stopstreep en de eerdergenoemde detector.

De volgende fase, wachtgroen, wordt meestal gebruikt om de groenfase te rekken als er op geen van de conflicterende richtingen verkeer wordt waargenomen. Het heeft dan soms geen zin om de groenfase te beëindigen.

De vierde groenfase, verlenggroen, is erg belangrijk in onze context. Hier wordt de groentoestand verlengd op basis van detectorinformatie. Als criterium wordt hiervoor meestal de hiaattijdparameter gebruikt. Hierover meer in 8.2.

Meeverlenggroen wordt tenslotte gebruikt als er groen wordt verlengd op richtingen die tegelijkertijd groen hebben en het geen zin heeft om deze signaalgroep al naar geel te schakelen.

7.9 Netwerken

Een verkeersnetwerk N is gedefinieerd als een graaf en bevat een set met kruispunten K en een set met links L . Links zijn de verbindingen tussen de verschillende kruispunten. Omdat het voor dit probleem belangrijk is aan welke arm van een kruispunt een link aansluit, is een link niet gedefinieerd als een relatie $K \times K$ maar als een relatie tussen twee armen, $A \times A$

$$N = (K, L)$$

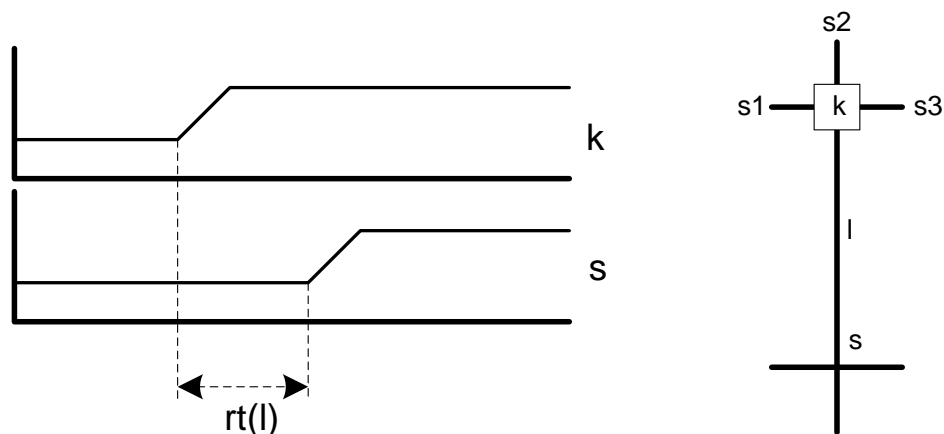
Een link is dus een verbinding tussen twee kruispunten en loopt van een afvoerende arm van één kruispunt naar een aanvoerende arm van een ander kruispunt. We noteren dit als een tuple van deze twee armen:

$$L \subseteq A_U \times A_A$$

Een verkeersnetwerk is een eindige, gerichte, gewogen en samenhangende graaf. Het gewicht van de links komt overeen met de reistijd van het verkeer tussen de kruispunten bij een vrije verkeersstroom. Die noteren we met de functie rt :

$$rt : L \rightarrow \mathbb{T}$$

Het tijddomein noteren we als \mathbb{T} . In Figuur 11 is het begrip reistijd gevisualiseerd. Een toename in verkeersaanbod op de signaalgroepen van kruispunt k op een zeker tijdstip is na het verstrijken van de reistijd op de verbindende link ook meetbaar op de signaalgroep s van een aanliggend kruispunt.



Figuur 11 - Reistijd op een link

Om een correcte inschatting te kunnen maken van de tijd die verkeer er over doet om een link af te rijden, moet rekening worden gehouden met de lengte van dit stuk weg en de geldende maximumsnelheid. Maar zoals we hebben gezien in

Fundamenteel diagram is ook de verkeersdichtheid van belang bij het bepalen van de reistijd, aangezien deze invloed heeft op de gereden snelheid. Aan de hand van de waarnemingen uit het dichtheid/snelheid-diagram kunnen we een inschatting maken van de gereden snelheid bij verschillende dichtheden en daarmee ook een betere benadering doen van de reistijd.

Op het moment dat het verkeer de gehele link heeft afgelegd, komt het aan op de aanvoerende arm van het volgende kruispunt. Daar zal het zich verdelen over de aanwezige signaalgroepen. Hoe het verkeer zich verdeelt, kunnen we enigszins schatten aan de hand van historische loginformatie. Deze verdeling kan verschillen tussen twee tijdstippen (denk bijvoorbeeld aan ochtend- en avondspits) en

is dus tijdsgebonden. We stellen dat als een aanvoerende arm a bestaat uit signaalgroepen $\{s_1 \dots s_n\}$, op tijdstip t elke signaalgroep s_i een deel $d_{s_i,t}$ in het interval $[0,1]$ van het verkeer op a te verwerken krijgt. Omdat precies al het verkeer verwerkt moet worden, kunnen we zeggen dat:

$$\sum_{s \in a} d_{s,t} = 1$$

Waar n weer het aantal signaalgroepen op de betreffende arm representeert. De waarde die $d_{i,t}$ aanneemt voor verschillende i en t is zoals gezegd achteraf te meten en vooraf te schatten aan de hand van detectie-informatie uit het verleden.

In een verkeersnetwerk kunnen we modelleren dat we van alle kruispunten detectie-informatie kunnen verkrijgen, maar in de praktijk bevat een link tussen twee kruispunten soms ongeregelde kruispunten. Dat betekent dat er verkeer de link op- of afrijdt zonder dat we dat kunnen meten, een zogenaamde lekfactor. Hierdoor kunnen we de hoeveelheid verkeer niet exact berekenen, maar wel benaderen met een schattig. De lekfactor van een link l op tijdstip t noteren we als:

$$lf(l,t)$$

Dit geeft de verkeerstoename (positieve waarde) of –afname weer als percentage van het gemeten verkeer die optreedt door de aanwezigheid van ongeregelde kruisingen of kruisingen zonder (beschikbare) detectieapparatuur. Ook hier geldt dat dit achteraf te bepalen is aan de hand van detectie-informatie van de kruispunten aan weerszijden van de link. Van tevoren kunnen we alleen een schatting doen aan de hand van eerdere informatie van gelijke perioden (spits, daluren, dag van de week).

7.10 Verkeersbewegingen

We stellen dat een verkeersverplaatsing (\rightarrow) mogelijk is van link $m (a_{u1}, a_{a1})$ naar link $n (a_{u2}, a_{a2})$ als er een signaalgroep s bestaat waarvoor geldt dat:

$$\exists s \in m_a [m \rightarrow n \Leftrightarrow n_u \in s_U]$$

Dit noteren we als:

$$m \rightarrow n$$

Indien er een indirecte verbinding tussen twee links $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow \dots \rightarrow L_n$ bestaat, noteren we dat als volgt:

$$L_1 \rightarrow^+ L_n$$

Voor het gemak definiëren we dezelfde relatie ook voor signaalgroepen en links:

$$s \rightarrow L$$

En voor signaalgroepen en aanvoerende armen aan het einde van een link:

$$s \rightarrow a$$

Om de duur van verkeersbewegingen te kunnen beredeneren hebben we niet genoeg aan de reistijden op de links. Omdat een zekere wachttijd bij rood op kruispunten inherent is aan het gebruik van verkeerslichten, is die ook van belang. De roodtijd per cyclus bij signaalgroep s op tijdstip t noteren we als:

$$\bar{r}_{s,t}$$

Deze wachttijd is af te leiden uit de informatie die vergaard wordt uit de verkeersregelinstallatie. Als er op tijdstip t_0 een wachtrij voor een signaalgroep s opbouwt, s leidt verkeer naar arm a_1 en a_1 is via link l verbonden aan arm a_2 van kruispunt k , dan kunnen we het tijdsmoment t_a dat deze wachtende voertuigen aankomen bij arm kruispunt k op a_2 als volgt berekenen:

$$t_a(l, s, t_0) = t_0 + r_{s,t_0} - vrt(s, t_0) + rt(l)$$

Hier geeft $vrt(s, t_0)$ de reeds verstreken roodtijd op deze signaalgroep weer. Die moet immers worden afgetrokken van de gemiddelde wachttijd van de betreffende richting.

Een probleem hiermee is dat we rekenen met de gemiddelde wachttijd voor een kruispunt. We zouden ook nog rekening moeten houden met de verstreken tijd sinds het start-rood moment van de betreffende signaalgroep: die moeten we immers aftrekken van de wachttijd. We komen dan tot een betere schatting, maar omdat de regeling verkeersafhankelijk is, is het nooit goed te voorspellen hoe lang een volledige cyclus zal duren. Aan de hand van eerdere informatie op een vergelijkbaar moment (qua intensiteit op verschillende richtingen) zouden we echter wel een goede schatting kunnen maken. Dit zullen we hier echter niet verder bespreken.

8 Parameteraanpassing

Om snel in te grijpen in de verkeersregelende functie van een VRI, is het belangrijk dat we op afstand iets kunnen wijzigen in de automaat. Via het daarvoor ontworpen protocol (IVERA) is het mogelijk om parameters in de automaat bij te stellen. In [22] en [23] staat de functionele en technische werking van dit protocol beschreven. De regelapplicatie gebruikt deze parameters voor de timing en andere aspecten van de signaalgroepafwikkeling.

8.1 Maximumgroentijd

Zoals beschreven in het hoofdstuk 7.8 bestaat de externe groenfase van een signaalgroep uit een aantal interne fasen. Een daarvan is de verlenggroenfase. De regelapplicatie zorgt dat deze fase wordt gehandhaafd zolang er verkeer wordt waargenomen door een detector (de zogenaamde hiaatdetector) behorende bij de betreffende signaalgroep. Dit zorgt er voor dat langere wachtrijen volledig kunnen worden afgewikkeld en dat aankomend verkeer ook een kans heeft om de groenfase te benutten. Het einde van de verlenggroenfase wordt ingeluid door één van twee gebeurtenissen. Dat kan zijn doordat de hiaatdetector gedurende een bepaald aantal seconden (de zogenaamde hiaattijd van deze signaalgroep) geen verkeer waarneemt. Er is dan een hiaat gevallen in de verkeersstroom en het is nuttig om de verlenggroenfase te beëindigen. De andere mogelijkheid is het overschrijden van de maximumgroentijdparameter van de signaalgroep. Het is onwenselijk dat de signaalgroep nooit een rood licht zou tonen bij een aanhoudende verkeersstroom, dus is er een grens gesteld aan de duur van de verlenggroenfase.

De drempelwaarde (de maximumgroentijdparameter) is echter vrij instelbaar. Bij toenemende drukte op een bepaalde signaalgroep is het voor de doorstroming gunstig om de maximumgroentijd wat naar boven bij te stellen. Dit zorgt potentieel immers voor een langere groenfase en dus een betere verwerkingscapaciteit van de signaalgroep. Aan de andere kant zou een lagere instelling een kans geven aan een drukker (en wellicht overbelaste) signaalgroep om een langere rij wachtend verkeer af te wikkelen.

8.1.1 Effect

Zoals gezegd kan een beëindiging van de verlenggroenfase twee oorzaken hebben: een hiaat in de verkeersstroom of het overschrijden van de maximumgroentijd. Het ligt voor de hand dat het eerste vaker zal plaatsvinden bij een lagere intensiteit op de betreffende signaalgroep en dat de maximumgroentijd eerder bepalend zal zijn bij een drukker verkeersbeeld. Ook een verhoging van de maximumgroentijd zal dit effect hebben, zoals te zien in de staafgrafiek in Figuur 12. Bij een verzadigde signaalgroep (dat wil zeggen: een aanvoer van verkeer) zal een verhoging van de

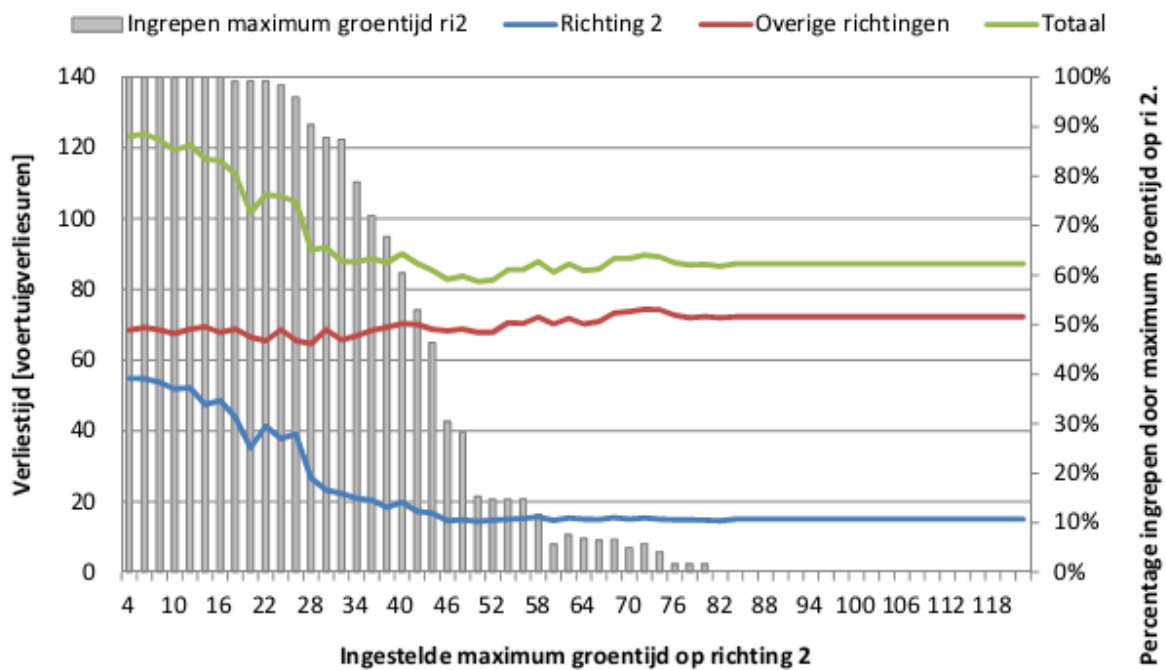
maximumgroentijdparameter bij elke groenfase een direct effect hebben op de afrijcapaciteit. Zoals vermeld in 7.7.2 zal een toevoeging van twee seconden achteraan de groenfase een verhoging van de afrijcapaciteit met één pae tot gevolg hebben.

Cyclustijd: de afrijcapaciteit van een richting is bij benadering recht evenredig met de hoeveelheid groen die een richting per uur krijgt. Een verdubbeling van de groentijd per cyclus leidt echter niet tot een verdubbeling van de capaciteit. Dit komt doordat de andere richtingen nog steeds evenveel groen krijgen en de cyclustijd dus langer wordt. Een rekenvoorbeeld: een cyclus duurt 100 seconden waarvan onze richting 20 seconden groen heeft. Verdubbelen we de groenduur, dan neem zowel de groenduur als de cyclustijd toe: naar respectievelijk 40 en 120 seconden. Voor de aanpassing had onze richting $1/5$ van de cyclusduur groen licht, na de verdubbeling is dat $1/3$ geworden.

Een aanpassing van de maximumgroentijd heeft echter ook secundaire effecten. Zo wordt de wachttijd op andere richtingen hoger, die moeten immers wachten op een langere groenfase van de betreffende richting. Een risico hierbij is dat het probleem dat met een verhoging van de parameter opgelost zou moeten worden slechts wordt verplaatst naar een andere richting.

Bij het instellen van deze parameter moeten grenzen in acht worden genomen. Een te lage waarde kan er zoals gezegd voor zorgen dat de prestaties van de signaalgroep sterk negatief worden beïnvloed. Aan de andere kant komt bij een te hoge waarde de geloofwaardigheid van de regeling in het gedrang: bestuurders op conflicterende richtingen staan dan mogelijk (te) lang te wachten voor hun verkeerslicht.

Uit het onderzoek in [1] blijkt dat de parameterwaarde beter te hoog dan iets te laag kan worden ingesteld. Een te lage waarde is funest voor de prestatie van de betreffende richting. Een te hoge instelling gaat ook ten koste van de prestaties (van de andere richtingen op het kruispunt welteverstaan), maar in veel mindere mate. Hier zal rekening mee moeten worden gehouden in het afstelproces.



Figuur 12 - Gevoeligheid maximumgroentijd [1]

8.1.2 Bestaande methoden

Een veelgebruikte methode om de maximumgroentijd te bepalen is Optimax. Deze methode gebruikt detectie-informatie van vorige cyclus om de parameter zo in te stellen dat de verliestijd op het totale kruispunt zo laag mogelijk is. Daarin worden drie situaties onderscheiden: onderbelasting, overbelasting en een optimalisatiefase. In het geval van onderbelasting (dat wil zeggen: er is dusdanig weinig verkeer dat de verkeersregeling dit eenvoudig kan verwerken) worden de maximumgroentijden hoog ingesteld. Omdat er door de lage verkeersintensiteit regelmatig een hiaat valt in de verkeersstromen, wordt de maximumgroentijd zelden bereikt.

In geval van overbelasting worden de maximumgroentijden ingesteld op vooraf ingestelde maximumwaarden. Deze waarden hangen vooral af van het belang van de verschillende richtingen (op bijvoorbeeld een ringweg is het gewenst dat de hoofdrichtingen meer groen krijgen dan de zijrichtingen).

In het geval tussen onder- en overbelasting moet er aan de hand van de actuele intensiteiten worden bepaald wat de instellingen voor de maximumgroentijdparameters gaan worden. Hierbij wordt gekeken naar de vorige fasecyclus en wordt er geanticipeerd op een iets drukker verkeersbeeld (factor 1,1 of 1,2) ten tijde van de aankomende cyclus. Dit heeft te maken met de waarnemingen en

berekeningen van Webster in [14] en de metingen in [1]: het nadeel van een te hoge instelling is veel kleiner dan dat van een te lage instelling.

8.1.3 Toepassing

Door de maximumgroentijd te verhogen, kan in potentie de afrijcapaciteit van een signaalgroep worden verhoogd. Bij een starre verkeersregeling (dat wil zeggen, niet-voertuigafhankelijk) worden zaken als groentijden en fasevolgorde vast ingesteld. Volgens [2] kunnen we aan de hand van de groenduur in zo'n starre regeling een waarde bepalen voor de maximumgroentijdparameter. Dit gaat volgens

$$t_{mvg,max} = a \cdot G - t_{vg}$$

waarin G de groentijd is in de optimale starre regeling, t_{vg} de vastgroentijd van de signaalgroep en a een vermenigvuldigingsfactor. De waarde van a is afhankelijk van het aantal fasen van de regeling en ligt gewoonlijk tussen 1,2 en 1,4. Hier kunnen we uit opmaken dat indien we x seconden extra groen per cyclus willen bewerkstelligen voor een bepaalde signaalgroep, we de maximumgroentijd moeten instellen met een waarde tussen de $\frac{6}{5}x$ en $\frac{7}{5}x$. Dit is onder het voorbehoud dat het verkeersaanbod voldoende is om de verlenggroenfase in stand te houden. Indien er hiaten vallen in de verkeersstroom, is elke verhoging van de parameter tevergeefs.

Als we van elke signaalgroep de te verwachten intensiteit hebben bepaald aan de hand van de methode beschreven in het hoofdstuk 9, kunnen we bekijken hoe we de maximumgroentijdparameter willen aanpassen op basis van deze informatie. We gebruiken de te verwachten intensiteiten Q_s van signaal groepen de verzameling signaalgroepen S . Een eerste naïeve bepaling van de maximumgroentijd van een richting s zou gebaseerd kunnen zijn op de relatieve afwijking van de intensiteit van die signaalgroep van het gemiddelde op het kruispunt:

$$mg(s) = nmg(s) \cdot \frac{Q_s}{\frac{1}{|S|} \cdot \sum_{t \in S} Q_t}$$

Hier representeert $nmg(s)$ een soort nominale maximumgroentijd van signaalgroep s . De relatieve afwijking van de standaardwaarde is dus gelijk aan de relatieve afwijking van de gemiddelde intensiteit van de betreffende richting.

Bovenstaande ingreep is lokaal gestuurd en zal dus geen rekening houden met de invloed van de verandering in verwerkingscapaciteit op stroomafwaarts gelegen kruispunten.

8.2 Hiaattijd

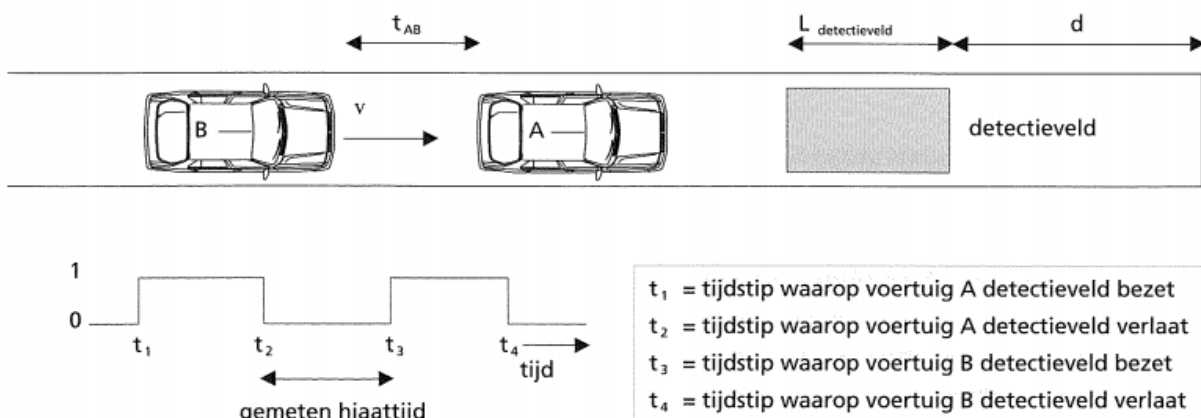
In een voertuigafhankelijke regeling houdt de verlenggroenfase meestal aan tot er door de detectieapparatuur een gat in de verkeersstroom wordt waargenomen. Hoe groot dat gat minimaal moet zijn (de grenswaarde), wordt gedicteerd door de waarde van de hiaattijdparameter van de betreffende signaalgroep. De verlenggroenfase eindigt als er een periode van minimaal lengte t_H optreedt waarin door de detector geen verkeer is waargenomen. Hier is t_H de actuele waarde van de hiaattijdparameter van signaalgroep s .

De gemeten hiaattijd wordt beïnvloed door de lengte van het detectieveld. We gaan hier uit van een inductieve detectielus in het wegdek omdat dit veruit de meest gebruikte vorm van verkeersdetectie op kruispunten is. Bij een lang detectieveld (stel: 10 meter) gebeurt het al snel dat een voertuig het detectieveld betreedt terwijl zijn voorganger het veld nog niet heeft verlaten. Dit zal dan niet worden waargenomen als een hiaat. Bij een korte detector is dat natuurlijk anders: het detectieveld is veel korter en hiaten zullen eerder (en langer) worden waargenomen. De gemeten hiaattijd is dus de tijd tussen het einde van een detectiemoment t_1 en het begin van het volgende detectiemoment t_2 . Dit is, zoals gezegd, niet het tijdsverschil tussen de voertuigen A en B t_{AB} , want er dient nog gecorrigeerd te worden voor de lengte van het detectieveld. Hoe groot deze correctie moet zijn, is afhankelijk van de snelheid v van de het tweede voertuig:

$$\text{gemeten hiaattijd} = t_2 - t_1 = t_{AB} - \frac{L_{dv}}{v}$$

Als de verlenggroenfase dus beëindigd moet worden na een werkelijke hiaattijd t_{grens} dan wordt de waarde voor de hiaattijdparameter t_H voor de betreffende signaalgroep als volgt bepaald:

$$t_H = t_{grens} - \frac{L_{dv}}{v}$$



Figuur 13 – Hiaatmeting [2]

Kort gezegd komt het er op neer dat een groenfase langer wordt verlengd bij een hogere hiaattijdparameterinstelling. Er moet immers een groter gat tussen voertuigen vallen om het eind van de verlenggroenfase in te luiden. Vice versa geldt ook dat deze fase eerder wordt afgebroken bij een lagere instelling. Omdat de lengte van het detectieveld bepaalt hoe lang het minimaal meetbare hiaat is, moet hier rekening mee worden gehouden bij de instelling van de parameter.

8.3 Modulestructuur

Een verkeersregelapplicatie stuurt zoals gezegd de verkeerslichten van verschillende signaalgroepen op een kruispunt aan. Intern worden de signaalgroepen gegroepeerd in zogenaamde modules die tegelijkertijd groen, rood en geel licht tonen. De volgorde waarin deze modules worden afgehandeld, de modulestructuur, is meestal vast (zie Figuur 14) maar wordt in sommige gevallen dynamisch bepaald (zie Figuur 15). Zo kan de module van een drukke richting bijvoorbeeld twee keer worden gerealiseerd in een cyclus. Op dit moment is er volop onderzoek gaande naar goede manieren om een dynamische modulestructuur in te vullen aan de hand van het actuele verkeersbeeld. Omdat dit een erg specialistisch onderwerp is en er momenteel volop onderzoek naar wordt gedaan, zal dit niet worden meegenomen in dit onderzoek. Een bijkomend probleem is het feit dat dit nog niet centraal is aan te sturen maar een functie is die volledig wordt beheerd door een individuele regelinstallatie. Het is voor de toekomst echter wel een interessante optie om te gebruiken in een gecoördineerd optimalisatieproces.



Figuur 14 - Statische modulestructuur



Figuur 15 - Dynamische modulestructuur

9 Intensiteit per signaalgroep voorspellen

We doen de aanname dat elke arm van een kruispunt slecht met één ander kruispunt is verbonden.

$$N = (K, L)$$

We willen de intensiteit schatten op een bepaald moment t op de signaalgroepen van arm a_a van kruispunt k . We doen de aanname dat er naast k slechts één kruispunt verbonden is aan deze arm:

$$\exists! l \in L : l_U = a_u$$

Door metingen van de detectieapparatuur bij alle signaalgroepen die verkeer naar a_u leiden, weten we daarvan de intensiteit. We weten ook de reistijd van link l , namelijk $rt(l)$. Alle groenrealisaties van die signaalgroepen die plaatsvinden tussen tijdstip t en $t_0 = t - rt(l)$ brengen voertuigen op link l .

Indien er in dat interval geen realisaties zijn geweest van de signaalroepen op a_a : tel daarbij op de wachtrij die al aanwezig was op t_0 . Als er wél een realisatie is geweest: tel de resterende wachtrij er bij op. Het resultaat is het aantal voertuigen op link l , $\#v_l$.

Vervolgens kunnen we kijken naar de signaalgroepen $\{s_1 \dots s_n\}$ op arm a_a . Omdat we een bepaling hebben gemaakt van de verdeling van de voertuigen over deze signaalgroepen, kunnen we een schatting maken van het aantal voertuigen dat elke signaalgroep te verwerken krijgt, namelijk $Q_s = d_{n,t} \cdot \#v_l$. Op basis van deze informatie kunnen we een nieuwe bepaling maken voor de in te stellen parameters van de regeling.

10 Netwerkoptimalisatie

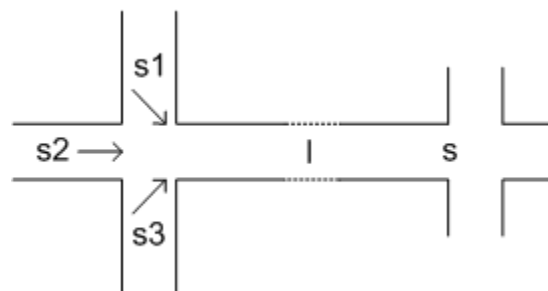
We hebben vastgesteld hoe een verkeersnetwerk er uitziet en hoe de verkeersstromen kunnen worden beïnvloed door middel van parameterwijzigingen in de regelapplicatie. Nu kunnen we gaan nadenken over een netwerkbrede toepassing hiervan. Als er een overbelastingssituatie wordt vastgesteld in het netwerk, kan dit op grofweg twee manieren worden aangepakt.

10.1 Probleemsignalering

Ongewone drukte is niet altijd een probleem. Zolang het verkeersaanbod in het netwerk de verwerkingscapaciteit van de verkeersregelinstallaties niet overstijgt, hoeft er in principe niet ingegrepen te worden. Pas bij overbelasting (zie 7.6) of een aanloop daartoe is het nuttig om wijzigingen aan te brengen in de regelparameters van installaties in het netwerk. Omdat overbelasting een situatie is waarbij de wachtrij van een signaalgroep bij een groenrealisatie niet geheel kan afrijden, is het eenvoudig om dit te detecteren: na een groenrealisatie wordt er (vrijwel) direct weer verkeer gedetecteerd door de detector bij de stopstreep. We kunnen er ook voor kiezen om een situatie die net onder overbelasting ligt te classificeren als ongewenst. We kunnen dan stellen dat een situatie bij signaalgroep s op tijdstip t problematisch is als de huidige intensiteit groter is dan de capaciteit van de signaalgroep vermenigvuldigd met een factor α waarvoor geldt dat $0 < \alpha \leq 1$.

$$probleem(s, t) \Leftrightarrow Q(s, t, t - terugkijktijd) > \alpha \cdot C(s)$$

Omdat het verkeer, zeker bij de stopstreep van een verkeerslicht, zeer onregelmatig is, kunnen we niet de intensiteit op een bepaald moment bepalen. Er moet dus een bepaalde periode worden beschouwd. In bovenstaande uitdrukking is deze van lengte *terugkijktijd*.



Figuur 16 - Enkelvoudige intensiteitsvoorspelling

Een overbelastingssituatie voorspellen is iets minder triviaal. We zullen moeten signaleren wanneer er een situatie optreedt waarin signaalgroepen het verkeer nog net kunnen verwerken en er naar aanleiding van het verkeersbeeld op omliggende kruispunten een toename in het verkeersaanbod kan worden verwacht.

Laat S een verzameling zijn van signaalgroepen waarvoor geldt dat $\forall s \in S. s \rightarrow a$. We kunnen dan de hoeveelheid verkeer die arm a (verbonden aan link l) te verwerken krijgt op tijdstip t uitdrukken als:

$$\sum_{s \in S} vv(s, a, t) \cdot Q(s, t, t - rt(l)) \cdot lf(l, t)$$

In bovenstaande uitdrukking is te zien dat we bekijken welke signaalgroepen verkeer afwikkelen naar arm a waarop de betreffende signaalgroep zich op bevindt. De te verwachten intensiteit is de hoeveelheid aankomend verkeer op de arm die vervolgens voorsorteert voor de signaalgroep. Ligt het te voorspellen moment in de toekomst, dan kunnen we zeggen dat:

$$probleem(s, t) \Leftrightarrow d(s, t) \cdot \sum_{q \in S} vv(s, a, q) \cdot Q(q, t, t - rt(l)) \cdot lf(l, t) > \alpha \cdot C(s)$$

Een probleem hiermee is dat we nog niet verder in de toekomst kunnen kijken dan de reistijd op de betreffende link. We kunnen echter verder kijken door de intensiteit op verder weg gelegen signaalgroepen op eenzelfde manier te bepalen, namelijk door te kijken naar de aanvoer naar die signaalgroepen vanaf omliggende kruispunten. Zoals vaker het geval is bij voorspellingen wordt ook deze onnauwkeuriger naarmate we verder vooruit gaan kijken. Dit komt doordat we in de functie vv uitgaan van een gemiddelde distributie van verkeer bij vergelijkbare situaties, terwijl de actuele waarden significant zouden kunnen afwijken door allerlei factoren, bijvoorbeeld het weer. Vooralsnog is dit echter de beste methode om enigszins betrouwbare voorspellingen te kunnen doen.

10.1.1 Pseudocode

Probleemsignalering t

```

Foreach signaalgroep s
  i ← intensiteit van s tussen nu en nu-terugkijktijd
  If i > a * capaciteit van s
    Probleem(s, nu);

```

Probleemsignalering t+1

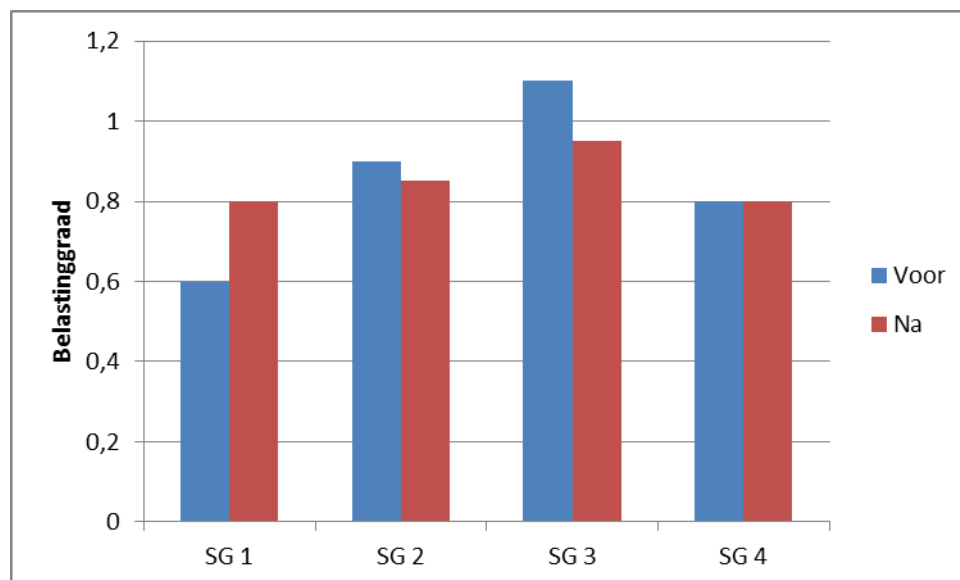
```
Foreach signaalgroep s
  a_aan = arm waar s op ligt
  l = link waar a_aan de aanvoerende arm van is
  a_af = afrijdende arm van l
  S = signaalgroepen die afrijden naar a_af
  Q_verwacht = 0;
  Foreach signaalgroep s1 in S
    Q_verwacht += vv(s, a_af, nu) * Q(s1, nu-rt(l), nu)

  aanbod_a = Q_verwacht / rt(l)
  aanbod_s = aanbod_a * d(s,t)

  If aanbod_s > a * capaciteit van s
    Probleem(s, nu+1);
```

10.2 Aanpak

Het doel van dit algoritme is niet om de totale drukte in het netwerk te verminderen. Het optimaliseren van de verschillende aspecten van individuele regelingen kunnen de applicaties inmiddels vrij goed zelf en de hoeveelheid verkeer kunnen we ook niet verminderen. Daarom richten we ons op het verdelen van de drukte. Overbelasting op één punt in het verkeersnetwerk kunnen we door parameteraanpassingen uitvlakken over een groter gebied. In Figuur 17 wordt dit geïllustreerd.



Figuur 17 - Uitvlakken signaalgroepbelasting

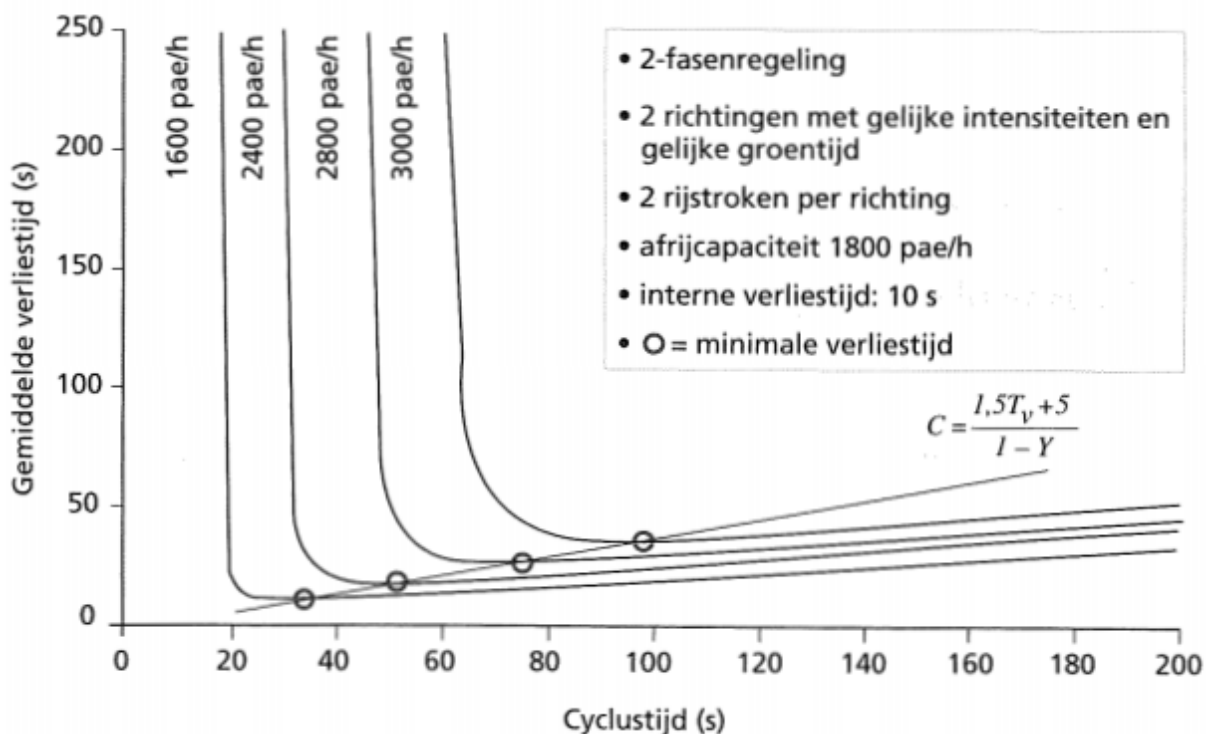
Voor het uitvoeren van wijzigingen van de maximumgroentijdparameter van de signaalgroepen is de belasting sterk uiteenlopend waarbij SG3 zelfs overbelast is (belastinggraad groter dan 1). Door de capaciteit te verdelen over de signaalgroepen door middel van het instellen van nieuwe waarden voor de maximumgroentijdparameters van de richtingen wordt de belasting genivelleerd.

De methode waarmee we de geschiktheid van een bepaalde set parameters kunnen testen rekent dus met de belastinggraad en wordt negatief beïnvloed door sterk uiteenlopende waarden bij verschillende signaalgroepen:

$$fitness(S, t) = \sum_{s \in S} BG(s, t)^2$$

De gevonden oplossing is optimaal als $fitness(S, t)$ een zo laag mogelijke waarde bereikt. Dit is het geval wanneer alle signaalgroepen in S een gelijke belastinggraad hebben.

De aanpassingen aan de maximumgroentijd moeten wel gebeuren binnen bepaalde grenzen. Zoals eerder beschreven begint de verlenggroenfase (waarvan het verstrijken van de maximumgroentijd een reden is om deze te beëindigen) na de vastgroenfase. Hierdoor is het geen probleem om de waarde van de maximumgroentijdparameter naar nul te brengen. Een maximumwaarde is lastiger te bepalen. Uit onderzoek van F.V. Webster in [14] blijkt dat er voor elke regeling een optimale cyclustijd bestaat zodanig dat de totale verliestijd van de regeling minimaal is. Zie Figuur 18 voor een illustratie van dit gegeven.



Figuur 18 - Optimale cyclustijd voor verschillende belastingen

In deze figuur is ook te zien dat de verliestijd sterk stijgt bij een lagere cyclustijd maar dat die stijging veel geleidelijker is bij een verhoging van de cyclustijd.

10.2.1 Afvoer verhogen

Zoals gezegd is één van de mogelijke oplossingen voor een overbelastingsprobleem in een verkeersnetwerk het bevorderen van de afvoercapaciteit van de overbelaste richting(en). Door problemen te herkennen en te voorspellen aan de hand van de methoden die in 10.1 aan bod zijn gekomen, wordt duidelijk op welke signaalgroepen in het netwerk een ingreep gewenst is.

Bij een verkeersonafhankelijke (starre) regeling zijn zaken als fasevolgorde en groentijden vastgezet. Die worden bepaald aan de hand van een gemiddeld verkeersbeeld en kunnen dus niet inspelen op een veranderend verkeersbeeld. Deze regelapplicaties kunnen automatisch worden gegenereerd aan de hand van het ATB-algoritme. Dit algoritme is ontwikkeld door IT&T en kan voor standaardkruispunten snel regelapplicaties genereren die grotendeels voldoen in gevallen die niet veel afwijken van een gemiddelde situatie.

Bij een regeling die wél verkeersafhankelijk is, kan de optimale instelling voor de maximumgroentijdparameter voor een bepaalde signaalgroep worden bepaald aan de hand van de groentijdingstelling van die signaalgroep volgens onderstaande formule uit [2]:

$$mg_s = a \cdot G_s - vg_s$$

Waar G_s de groentijdingstelling in een starre regeling voorstelt, vg_s de ingestelde vastgroentijd (zie 7.8) en a een vermenigvuldigingsfactor is die tussen de 1,2 en 1,4 ligt. De exacte waarde van a hangt af van het aantal fasen van de regeling.

Eerder hebben we gezien hoe er een schatting te maken is van de verkeersintensiteit op een signaalgroep aan de hand van de verkeersdetectiegegevens van omliggende kruispunten. Daarmee is een voordeel te behalen ten opzichte van bestaande methoden om de maximumgroentijd te bepalen, omdat die methoden uitgaan van informatie op hetzelfde kruispunt van een cyclus geleden. In plaats van naar het verleden te kijken, kan er dus een voorspelling worden gemaakt.

Door voor alle signaalgroepen een voorspelling te doen voor de komende cyclus, komen we tot een voorspelling van het verkeersbeeld op het hele kruispunt op een bepaald moment in de toekomst. Dat kan als input dienen voor het eerder aangehaalde ATB-algoritme om groentijden te bepalen in een starre regeling. Aan de hand daarvan kunnen vervolgens met de formule hierboven de optimale maximumgroentijdparameterwaarden worden bepaald. Eerder hebben we al gezien dat het instellen van een te lage maximumgroentijd een groot nadeel heeft, dus daar zal voor gewaakt moeten worden. Het licht verhogen van deze waarde voor drukke signaalgroepen kan hierbij uitkomst bieden. De hier bepaalde waarde is de uitgangswaarde voor de nieuwe instelling van de parameter.

Om er voor te zorgen dat de waarde waarschijnlijk niet te laag wordt ingesteld, vermenigvuldigen we de nieuw bepaalde waarde met een factor β . Dit is om te voorkomen dat het prestatieverlies optreedt dat kenmerkend is voor een te lage parameterwaarde, zoals beschreven in [1].

10.2.2 Aanvoer beperken

Als we aan de hand van de voorspelling uit paragraaf 10.1 bij een signaalgroep een overbelastingsprobleem verwachten in de toekomst, kunnen we dit probleem voorkomen of verminderen door de aanvoer naar de signaalgroep te beperken. Dit doen we door de afrijcapaciteit van de signaalgroepen op het aanliggende kruispunt te verlagen. Dat kan onder meer door het instellen van de een lagere maximumgroentijd. In [1] hebben we al gezien dat een instelling onder het optimum van de parameter de prestaties van de betreffende signaalgroep sterk kan verlagen. Dat is in dit geval exact de bedoeling. Door de afrijcapaciteit van deze richting te beperken, verminderen we het probleem dat bestaat (of binnenkort waarschijnlijk zal ontstaan) op een signaalgroep van een aanliggend kruispunt.

We zullen bij de verlaging van de maximumgroentijdparameter rekening moeten houden met de kracht van het effect dat deze ingreep zal veroorzaken. Als er slechts een klein overbelastingsprobleem dreigt te ontstaan, kan een kleine verlaging al genoeg zijn. Is het probleem echter groter, dan zullen we ook grotere aanpassingen moeten maken. De mate van overbelasting van een signaalgroep is uit te drukken als het aantal voertuigen boven de capaciteit van die richting:

$$ob(s, t) = Q(s, t) - \alpha \cdot C(s)$$

Als we hebben bepaald welke signaalgroepen verkeer aanvoeren naar de overbelaste signaalgroep, kunnen we de mate van doorstroombeperking bepalen die we middels de maximumgroentijdparameter gaan doorvoeren. Dit hangt af van twee factoren:

- Het aantal aanvoerende signaalgroepen
- De belastinggraad van elke aanvoerende signaalgroep

Als we de het verkeer naar de overbelaste signaalgroep willen beperken, is de ingreep per aanvoerende signaalgroep minder sterk als er meer van die aanvoerende richtingen bestaan. Het effect is immers cumulatief. Uitgaande van deze correctie, zou de aftrek van de maximumgroentijdparameter voor signaalgroep s_a op tijdstip t ($amg(s, t)$) als volgt kunnen worden bepaald:

$$amg(s_a, t) = \frac{ob(s, t)}{2a} \cdot \frac{1}{n}$$

Waar n het aantal aanvoerende richtingen voor signaalgroep s weergeeft en n het aantal aanvoerende richting is. De factor a is hier dezelfde als die in de formule waarmee de maximumgroentijdparameter werd berekend aan de hand van de groentijden in de optimale starre regeling. Die wordt vermenigvuldigd met 2 omdat er, zoals beschreven in [2], ongeveer 1 voertuig per 2 seconden kan afrijden. Dit geldt alleen voor het tweede deel van het afrijdproces, waarin de voertuigen gelijkmatig de stopstreep passeren. We kunnen hier van uitgaan omdat er aan te nemen valt dat het eerste deel van het afrijdproces, waarin sprake is van optrekverlies, plaats vindt in de vastgroenfase

Verder willen we voorkomen dat een ingreep op een signaalgroep een dusdanig negatief effect heeft op de prestaties dat er in de volgende fasecyclus juist daar overbelastingsproblemen optreden. Daarom moet er worden gekeken naar de belastinggraad van de aanvoerende richtingen, zodat de maximumgroentijdbeperking kan worden verminderd voor richtingen die al sterk belast zijn. Het uitvlakken van de overbelasting over de verschillende signaalgroepen is een oplossing. We schalen daarom de kracht van de ingreep omgekeerd evenredig met de hoeveelheid overbelasting:

$$amg(s, t) = \min(mgt_s, 2a \cdot - \left(\sum_{sa \in S} \frac{ob(sa, t)}{C(sa)} \right) \cdot C(s) \cdot \frac{1}{rs_s})$$

Waarin S een verzameling is met alle aanvoerende signaalgroepen naar s , plus de overbelaste signaalgroep zelf. Zouden we die laatste er uit laten, dan nemen we niet in overweging dat we willen voorkomen dat het oplossen van het dit probleem een probleem veroorzaakt bij de overbelaste signaalgroep. Er wordt hier ook rekening gehouden met het feit dat signaalgroepen kunnen bestaan uit meerdere rijstroken (rs_s). Als de overbelasting in voertuigen wordt uitgedrukt moet het worden gecorrigeerd voor het aantal rijstroken om te komen tot een gelijkwaardige correctie.

Het is niet mogelijk dat de maximumgroentijdparameter een negatieve waarde krijgt, dus is de aftrek maximaal de eerder door het ATB-algoritme bepaalde maximumgroentijd.

Nu we deze correctie op de maximumgroentijd hebben bepaald, blijft er nog een probleem over. Eerder hebben we al benoemd dat een kruispunt bij een zeker belasting een optimale cyclustijd kent om de verliestijd op het kruispunt zo laag mogelijk te houden. Nu we echter veranderingen hebben doorgevoerd op de groentijd van de signaalgroep, is die optimale cyclustijd niet langer gegarandeerd. Dit kunnen we oplossen door hier achteraf een correctie op te maken. Die begint met het bijhouden van de totale wijziging aan de maximumgroentijd van elk kruispunt in het netwerk. Deze tijd (positief of negatief) kan dan worden verdeeld over de maximumgroentijdparameters van alle signaalgroepen

op het betreffende kruispunt. Hiermee is het wel mogelijk dat we een deel van de verbetering die we eerder deden weer terugdraaien. Voor de algehele prestaties van het netwerk is het echter beter om deze correctie wel uit te voeren.

10.2.3 Combinatie

De in voorgaande paragrafen voorgestelde maatregelen kunnen we combineren. Door aan de hand van het ATB-algoritme een berekening te maken voor de maximumgroentijdparameters, bepalen we de uitgangssituatie voor het tweede deel van het algoritme, het beperken van de aanvoer naar overbelaste signaalgroepen. Hier wordt een aftrek ($amg(s_a, t)$) van de maximumgroentijd bepaald voor signaalgroepen die verkeer afwikkelen naar drukke delen van het netwerk. Dit resulteert in een set nieuwe parameterinstellingen die direct kan worden toegepast op de verkeersregelininstallaties via het IVERA-protocol.

Op deze manier is er een waarde voor de maximumgroentijd van de signaalgroepen in het netwerk berekend die een compromis sluit tussen twee doelen. Als eerste wordt er een waarde bepaald die aansluit op de te verwachten intensiteit op de betreffende signaalgroep. De tweede stap is het corrigeren van deze waarde om ervoor te zorgen dat we signaalgroepen verderop in het netwerk niet overbelasten door er te veel verkeer heen te laten stromen.

Pseudocode

```
//Bepaal verwachte intensiteit
Foreach signaalgroep s
    a_aan = arm waar s op ligt
    l = link waar a_aan de aanvoerende arm van is
    a_af = afrijdende arm van l
    S = signaalgroepen die afrijden naar a_af
    Q_verwacht = 0;
    Foreach signaalgroep s1 in S
        Q_verwacht += vv(s, a_af, nu) * Q(s1, nu-rt(l), nu)

    aanbod_a = Q_verwacht / rt(l)
    s.intensiteit = aanbod_a * d(s,t)

//Bereken maximumgroentijden met ATB
Foreach kruispunt k in netwerk
    Foreach signaalgroep s in k
        s.mgt = ATB.BepaalMGT(k, s);

//Vlak drukte in toekomst uit
Foreach signaalgroep s
    s.mgt -= bepaal_mgt_aftrek(s)
```


10.3 Effect

Het ontworpen algoritme is bedoeld om de drukte uit te vlakken over meer signaalgroepen en een groter deel van het verkeersnetwerk. Het verbetert niet de verwerkingscapaciteit van de individuele verkeersregelinstallaties maar zorgt ervoor dat ophopingen van verkeer worden voorkomen, verminderd en opgelost.

11 Prototype

Aan de hand van het werk in de voorgaande hoofdstukken ontwerpen we hier een prototype wat het ontworpen algoritme implementeert.

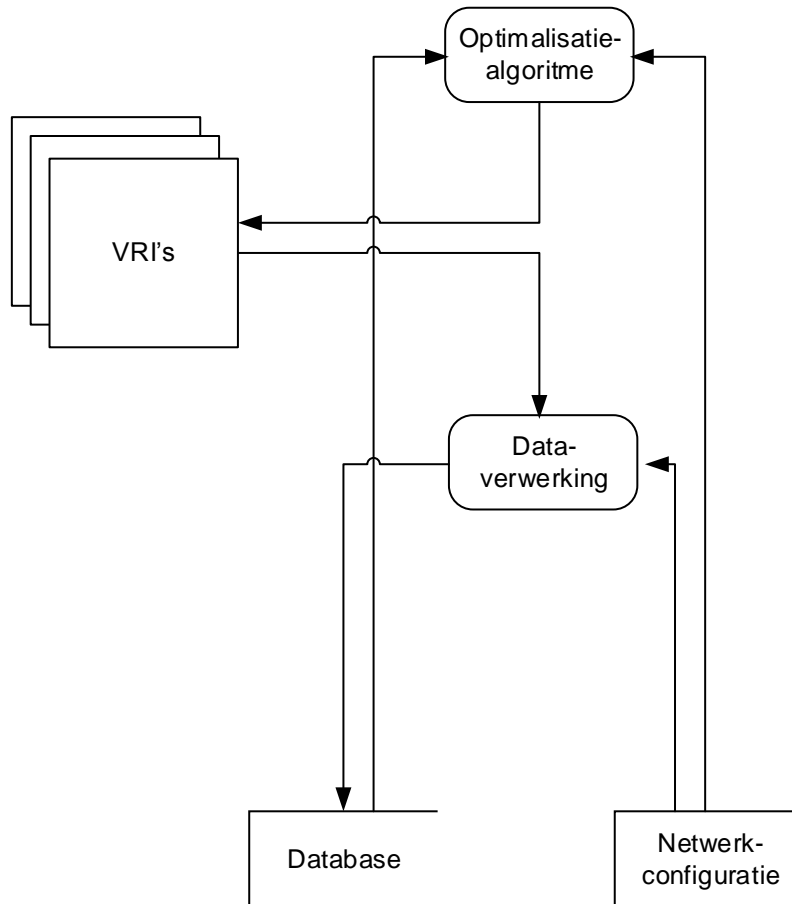
11.1 Functioneel ontwerp

We beginnen met een functioneel ontwerp. Hier wordt alles behalve de ‘binnenkant’ van het ontworpen prototype beschreven. Omdat het hier geen gebruikerssoftware betreft, zullen er geen usecases of gebruikersinterfaces worden ontworpen.

11.1.1 Functionaliteit

De belangrijkste functionaliteit van de software is het zo-realttime-mogelijk bijstellen van parameters in verkeersregelinstallaties die zich in een verkeersnetwerk bevinden aan de hand van het algoritme dat staat beschreven in hoofdstuk 8. Daartoe zal de software verkeerslogdata opvragen uit verkeersregelinstallaties en op basis daarvan parameterinstellingen bepalen en toepassen op diezelfde installaties met als doel het oplossen en voorkomen van overbelasting- en congestiesituaties in een verkeersnetwerk. Een secundaire, bijkomende functionaliteit is het vastleggen van de intensiteit verkeersstromen tijdens groenfasen van signaalgroepen. Deze informatie wordt door het optimalisatiealgoritme gebruikt maar kan later ook voor andere doeleinden worden aangewend.

11.1.2 Datastromen



Figuur 19 - Datastromen

In **Error! Reference source not found.** is te zien dat de software uit twee processen zal bestaan: het optimalisatiealgoritme zelf en een proces dat de verwerking van de loginformatie uit de verkeersregelinstallaties voor zijn rekening neemt. De netwerkconfiguratie (dat wil zeggen, de ligging en indeling van het verkeersnetwerk) beschouwen we hier als een gegeven en zal door het algoritme worden gebruikt om voorspellingen te doen en parameterwaarden te bepalen. Vanuit de verkeersregelinstallaties zal zo vaak mogelijk data worden opgehaald die informatie bevat over het verkeersbeeld op de kruispunten in het netwerk. Die informatie wordt verwerkt en geaggregeerd opgeslagen in een database waardoor het algoritme eenvoudig en snel de juiste informatie tot zijn beschikking heeft. Hier worden onder andere het tijdstip en de duur van groenfases van elke signaalgroep opgeslagen en de daarbij afgewikkelde verkeershoeveelheden.

11.1.3 Interfaces

De software zal, zoals gezegd, moeten worden gekoppeld aan drie externe entiteiten: de netwerkconfiguratie, de database en de verzameling verkeersregelinstallaties. Als databaseproduct is gekozen voor Microsoft SQL Server omdat dit aansluit bij de bestaande software en databases die

worden ontwikkeld binnen IT&T. De netwerkconfiguratie kan worden opgeslagen in een formaat wat op dit moment al wordt gebruikt in verscheidene producten om verkeersnetwerken te monitoren. Dit formaat voldoet niet geheel aan de eisen van deze software en zal daarom licht moeten worden uitgebreid.

De communicatie met de VRI's verloopt op twee verschillende manieren. Via het FTP-protocol worden logbestanden uit de automaten gedownload naar de software. In sommige oude automaten van een enkele fabrikant (Vialis) gaat dit via IVERA (hierover straks meer), maar deze methode is nu verouderd. De parameterinstellingen die worden berekend door het algoritme worden via het IVERA-protocol geactueerd. Dit protocol (beschreven in [22] en [23]) is een open en onafhankelijke standaard die is ontwikkeld om communicatie mogelijk te maken tussen een VRI en een beheercentrale. IVERA is een master/slave-protocol waarbij de VRI's de rol van slave vervullen ten opzichte van de beheercentrale, die de master is. Hiermee kunnen instellingen worden uitgelezen en aangepast en kan de actuele stand van zaken met betrekking tot verkeerslichten en detectoren worden bepaald.

11.1.4 Gegevensstructuur

Het optimalisatiealgoritme maakt gebruik van detectie-informatie en informatie over de verschillende fasen van een signaalgroep om nieuwe parameterwaarden te bepalen. Omdat de informatie uit de VRI's op signaalgroepniveau wordt gebruikt in het algoritme is het logisch om het ook op dit niveau op te slaan in de database. We zullen de volgende eigenschappen van elke groenfase van elke signaalgroep moeten vastleggen:

- Aanvangstijd van de groenfase
- Eindtijd van de groenfase
- Hoeveelheid afgewikkeld verkeer in pae/uur

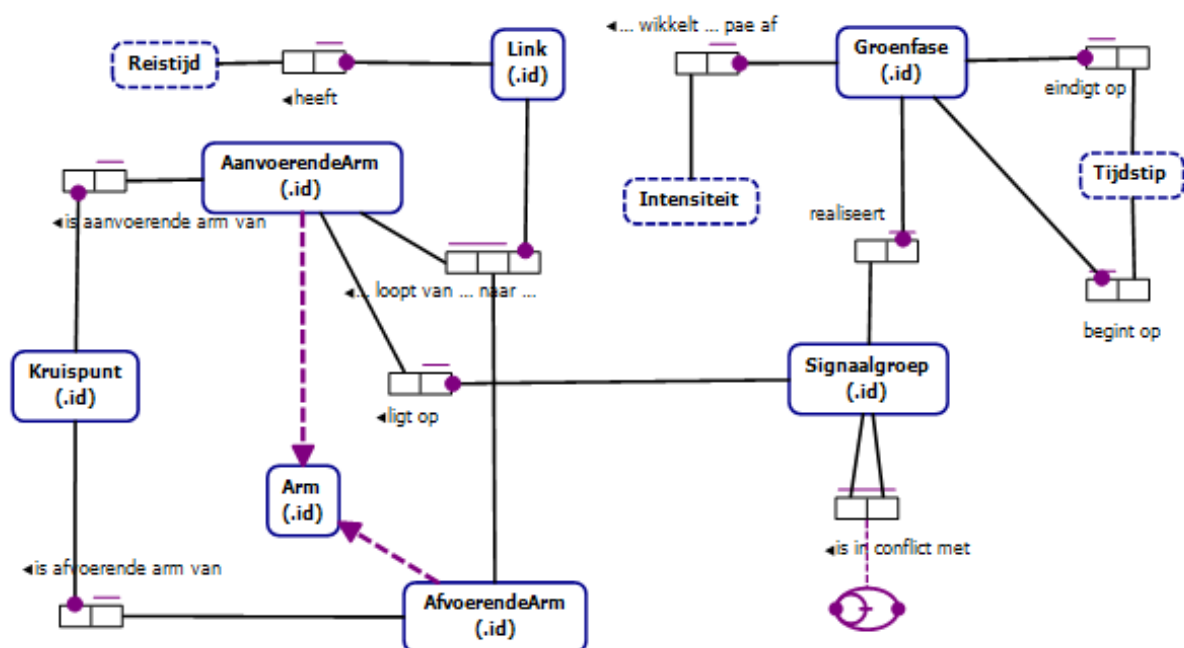
Dit zal, zoals gezegd, worden vastgelegd in een Microsoft SQL Server database. Het ontwerp voor de opslag volgt later in het technisch ontwerp.

De netwerkconfiguratie is gebaseerd op een formaat wat al wordt gebruikt in andere producten van IT&T. De volgende zaken moeten hierin zeker worden vastgelegd:

- Signaalgroepen
 - Arm waarop deze zich bevindt
 - Armen waarnaar verkeer wordt afgewikkeld
- Armen
 - Kruispunt waar deze deel van uitmaakt
- Netwerk
 - Welke armen via links met elkaar verbonden zijn
 - Reistijd op links

Informatie over de armen waarnaar verkeer wordt afgewikkeld door een signaalgroep is nog niet vast te leggen in het huidige configuratiemodel. Dit zal met een uitbreiding moeten worden bewerkstelligd.

Deze informatiebehoefte is vastgelegd in een ORM-model (zie Figuur 20) door middel van de notatie beschreven in [24].



Figuur 20 - ORM-model

We kunnen hier onderscheid maken tussen het configuratie- en het datadeel van het model. Het configuratiedeel beschrijft de statische situatie van het verkeersnetwerk en beslaat de entiteiten Kruispunt, Link, Arm en Signaalgroep en bijbehorende feit- en waardetypes. Deze informatie is en wordt vastgelegd in de netwerkconfiguratie. Het formaat hiervan komt niet volledig overeen met het

bovenstaande model, maar is wel deels compatibel. Dit wordt veroorzaakt doordat de specifieke focus van het model ligt op de context van dit onderzoek terwijl het configuratieformaat is ontworpen met een algemenere toepassing in het achterhoofd.

Het datadeel beschrijft de relaties tussen de informatie-onderdelen die voortkomen uit de logdata uit de verkeersregelinstallaties. Het gaat hier om de entiteit Groenfase en de daaraan gekoppelde feit- en waardetypes. De informatie die volgens dit deel van het model kan worden opgeslagen bevindt zich in de database en zal continu worden bijgewerkt en aangevuld. Beide delen worden via een enkel feittype ('realiseert') aan elkaar gekoppeld.

Naast de statische informatie die in de database wordt opgenomen, zijn er nog andere gegevens die worden meegenomen in de berekeningen. Dit zijn de lekfactor van een link en de verkeersverdeling van een aanvoerende arm naar signaalgroepen. Het is aannemelijk dat deze waarden fluctueren tussen verschillende dagen en tijdstippen en hierdoor is het verstandig om een verwachting hiervoor te bepalen aan de hand van eerder gemeten waarden.

Daarnaast is er nog de verdeling van verkeer vanaf samengestelde richtingen. Omdat hier niet te meten is welk deel van het verkeer naar welke arm afrijdt, moeten hiervoor aannames worden gedaan die in de database zullen worden opgenomen.

11.2 Technisch ontwerp

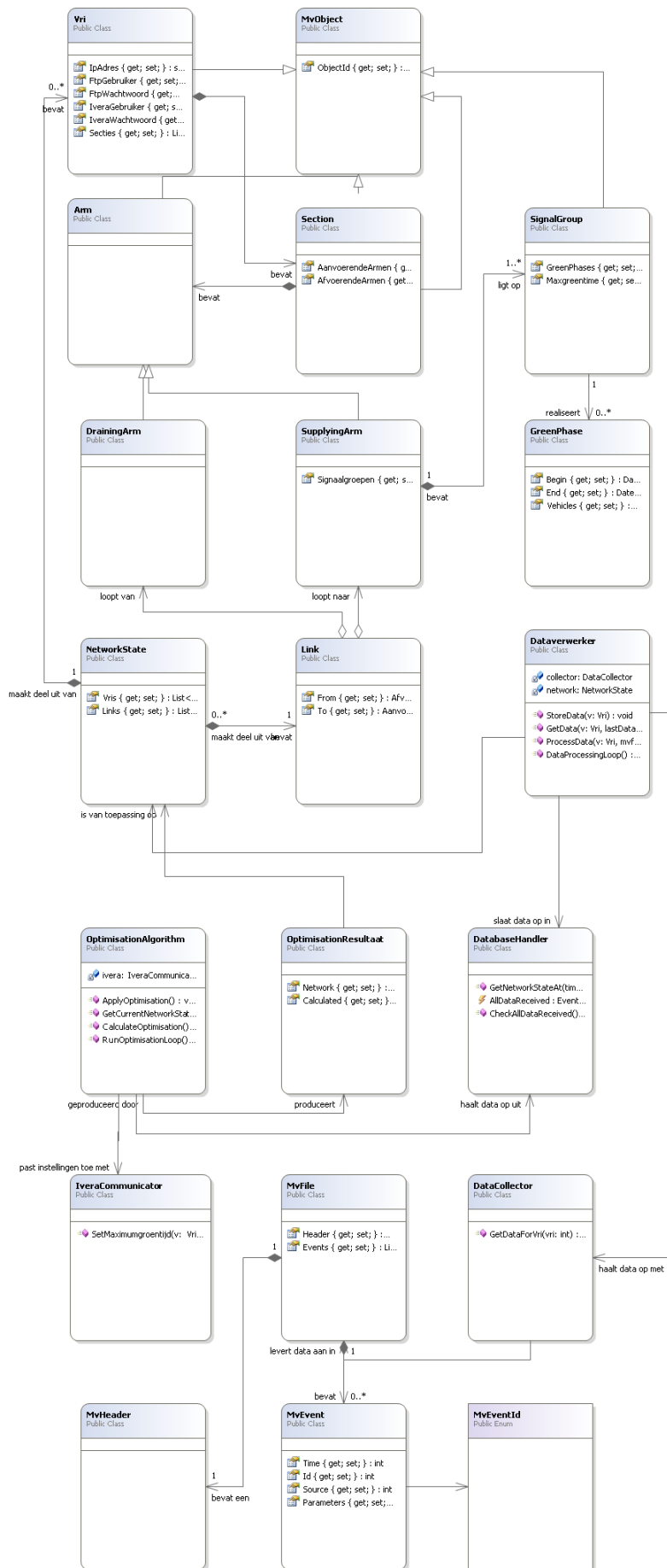
In het technisch ontwerp wordt vastgelegd wat de interne structuur van de software zal worden.

11.2.1 Architectuur

De architectuur kan worden vormgegeven door de processen in **Error! Reference source not found.** verder te specificeren en uit te werken. Het dataverwerkingsproces heeft als doel om de ruwe logdata uit de verkeersregelinstallaties te verwerken tot informatie die bruikbaar is voor het algoritme. Die data wordt opgeslagen in een database waarna het kan worden gebruikt door het optimalisatiealgoritme om nieuwe instellingen te berekenen voor de verkeersregelinstallaties in het netwerk.

11.2.2 Klassendiagram

In Figuur 11 is het opgetekende klassendiagram van de software te zien. Het dataverwerkingsproces uit **Error! Reference source not found.** is uitgesplitst over twee klassen, terwijl het algoritme wel in één klasse is gehuisvest. Verder zijn hier de klassen te vinden om de netwerkconfiguratie mee weer te geven. De hiërarchie in de boom van VRI tot signaalgroep is hier goed terug te zien.



Figuur 21 - Klassendiagram

Het optimalisatieproces en het dataverwerkingsproces functioneren los van elkaar en ondernemen actie wanneer dit nuttig is. Voor het dataverwerkingsproces betekent dit dat er regelmatig data opgehaald, verwerkt en opgeslagen zal worden. Het interval van dit proces is afhankelijk van de frequentie waarmee de verkeersregelininstallaties logfiles produceren. Steeds als er data in de database wordt opgeslagen wordt er berekend wat het laatste moment is waarop er data van alle installaties in het netwerk aanwezig was. De klasse die hiervoor verantwoordelijk is, DatabaseHandler, vuurt vervolgens een event af waar het optimalisatieproces op geabonneerd is. Omdat het nu zeker is dat alle informatie tot het bepaalde moment aanwezig is, kan er een berekening worden gemaakt volgens het optimalisatiealgoritme.

11.3 Testen

Een logische volgende stap na het implementeren van het beschreven ontwerp is het testen van het prototype en daarmee het algoritme. Daar zitten echter een aantal moeilijkheden aan. Testen in de praktijk is niet realistisch: geen wegbeheerder zal immers toestaan dat een nieuw algoritme autonoom instellingen in zijn verkeersregelininstallaties aanpast. Het is namelijk niet ondenkbaar dat een dergelijke eerste test niet helemaal de juiste uitwerking heeft en tot slechte prestaties en onveilige situaties zal leiden.

Een tweede optie is het laten 'droog oefenen' van het algoritme op loginformatie uit een bestaand verkeersnetwerk zonder het toepassen van de instellingen op de installaties. Een groot nadeel hiervan is dat er niet kan worden geëvalueerd of de door het algoritme bepaalde waarden het juiste effect hebben op de verkeersdoorstroming. Hiermee kan dus de technische werking wel worden gevalideerd, maar of het resultaat ook aan de functionele eisen voldoet blijft onbekend.

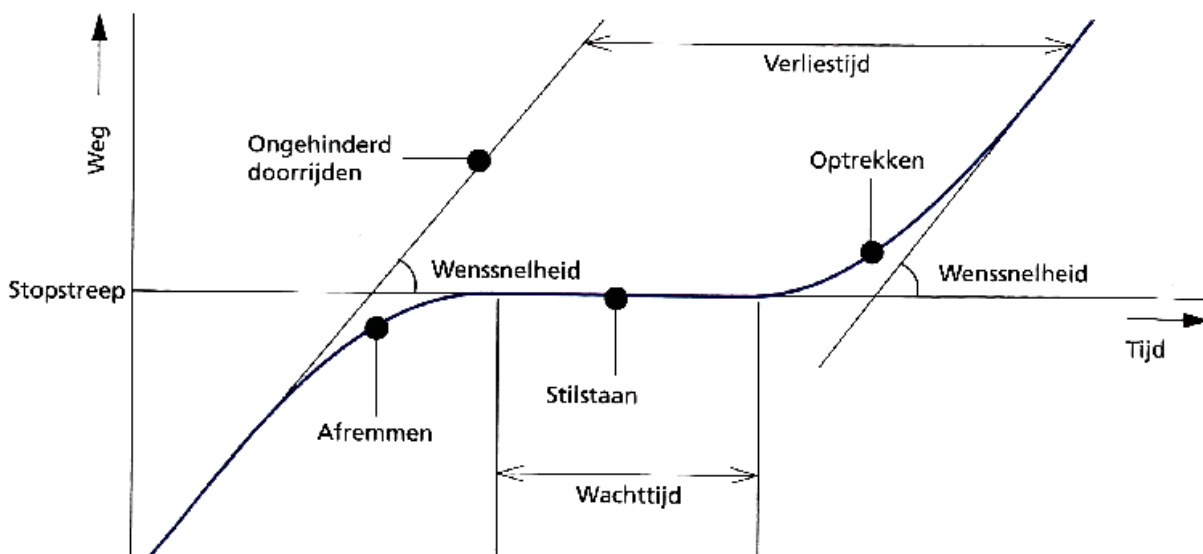
Een andere mogelijkheid is het testen van de software in een simulatieomgeving. Binnen IT&T worden verkeerssimulaties uitgevoerd met Vissim (zie [25]). Met dit pakket kunnen microscopische simulaties worden uitgevoerd voor bijna elke denkbare verkeerssituatie en het zou daarom erg geschikt zijn voor dit doel. Het opzetten van een realistisch netwerk met bijbehorende verkeersregelingen en mogelijkheden tot FTP- en IVERA-communicatie vergt echter veel werk. Daarom is samen met IT&T besloten om dit buiten de scope van dit onderzoek te houden en het testen na afloop uit te voeren.

12 Maatschappelijke en menselijke effecten

Het effect dat het uitvlakken en verdelen van verkeersdruk in een netwerk heeft op de wegen en kruispunten die beïnvloed worden door de ingrepen is nu beschreven. Dit zijn tot nu toe alleen effecten op verkeersdynamisch vlak, terwijl de weggebruiker er de resultaten van de ingrepen door dit algoritme ook zal ondervinden. Daarom is het interessant om uit te zoeken hoe de weggebruiker dit ondergaat, wat de effecten zijn van verkeerscongestie op het gemoed van de automobilist en of er economische consequenties verbonden zijn aan het verdelen van de druk. De vraag die hier centraal staat is: is gedeelde smart ook in dit geval halve smart?

12.1 Kosten van vertraging

Ondanks het feit dat het algoritme niet voorziet in het verlagen van de totale verkeersdruk, is het interessant om te kijken naar de economische aspecten van vertraging op de weg. Vertraging wordt gemeten in voertuigverliesuren. Een voertuigverliesuur staat gelijk aan één voertuig dat een vertraging van een uur oploopt. Zestig auto's die allen één minuut langer onderweg zijn genereren dus tezamen één voertuigverliesuur. Hierbij wordt niet alleen gekeken naar de tijd dat voertuigen stilstaan, maar ook de rem- en optrekverliezen die ontstaan bij bijvoorbeeld een verkeerslicht.



Figuur 22 - Verliestijdbepaling

In het tijd/wegdiagram in Figuur 22 is goed te zien hoe verliestijd wordt bepaald.

Om de economische effecten van een verkeersmaatregel zoals eerder beschreven te kunnen inschatten, moeten we meer kunnen zeggen over twee grootheden: de vertraging en de kosten hiervan. Het ontworpen algoritme kan de vertraging naar wens verdelen over verschillende

verkeersstromen, maar hoe zit het met de kosten? In opdracht van Rijkswaterstaat heeft TNO onderzoek gedaan (zie [12]) naar de socio-economische waarde van tijd. Voor 2010 blijkt een uur tijd tijdens woon-werkverkeer in West-Europa €8,98 waard te zijn. Dit stijgt naar €10,03 in 2020. Voor zakelijk verkeer ligt de waarde veel hoger, namelijk op €31,11 in 2010 en €34,72 in 2020. Een gemiddelde voor alle personen ligt op €10,03 in 2010 en €11,20 in 2020. Hiermee zijn we er echter nog niet, aangezien een auto meerdere personen kan bevatten. Ook hierin voorziet de bron, zoals te zien is in Tabel 2.

De eerste kolom geldt voor woon-werkverkeer, de tweede voor zakelijk verkeer (inclusief

Strong Europe (SE)			
2000	1,16	1,12	1,54
2006	1,14	1,11	1,50
2020	1,11	1,11	1,39
2040	1,10	1,08	1,36

Tabel 2 - Gemiddelde voertuigbezetting

vrachtvervoer) en de derde voor overige motieven. Als we hiermee rekenen, komen we op de volgende getallen voor de kosten van één voertuigverliesuur:

Motief	Per persoon	Bezetting	Per voertuig
Woon-werk	€8,60	1,14	€9,80
Zakelijk	€29,77	1,11	€33,04
Overig	€5,94	1,50	€8,91

Tabel 3 – Kosten voertuigverliesuren in 2006

Cijfers over de situatie in 2006 zijn te vinden in Tabel 3. Hier is te zien dat de kosten per persoon bij zakelijk verkeer veel hoger liggen dan voor de andere motieven. De voertuigbezetting is echter lager, waardoor de bedragen iets dichterbij elkaar komen te liggen.

Motief	Per persoon	Bezetting	Per voertuig
Woon-werk	€10,03	1,11	€11,13
Zakelijk	€34,72	1,11	€38,54
Overig	€6,92	1,39	€9,62

Tabel 4 – Kosten voertuigverliesuren in 2020

In 2020 zijn de bedragen in alle categorieën hoger dan 14 jaar eerder. De voertuigbezetting neemt weliswaar af, maar omdat de tijd per persoon dunder wordt liggen de waarden per voertuig per categorie respectievelijk 14%, 17% en 8% hoger.

Omdat de samenstelling van het hele verkeersbeeld uit de genoemde motieven sterk kan verschillen per dagdeel en locatie, is het moeilijk om een algemeen geldend cijfer te geven over de prijs van één voertuigverliesuur. Er zijn wel hypothesen te formuleren over de relatieve samenstelling, bijvoorbeeld dat woon-werkverkeer sterk vertegenwoordigd is in de ochtend- en avondspits en dat zakelijk verkeer voornamelijk tussen 8.00 uur en 18.00 plaatsvindt. Zonder verder onderzoek kunnen we hier echter niet vanuit gaan.

12.1.1 Toepassing

Als er echter aan de hand van empirisch onderzoek een schatting kan worden gedaan van de samenstelling van de verschillende verkeersstromen in een netwerk op verschillende tijdstippen, dan kan het algoritme hier op inspelen. De fitness-functie die de geschiktheid van een gevonden oplossing bepaalt kan ook worden aangepast zodat deze rekening houdt met de kosten van de vertragingen in plaats van de verliestijd per signaalgroep. Zo kan het algoritme worden ingericht om de economische prestaties te bevorderen en de maatschappelijke kosten te drukken zonder dat hier een ingrijpende verbouwing van het wegennet voor hoeft plaats te vinden.

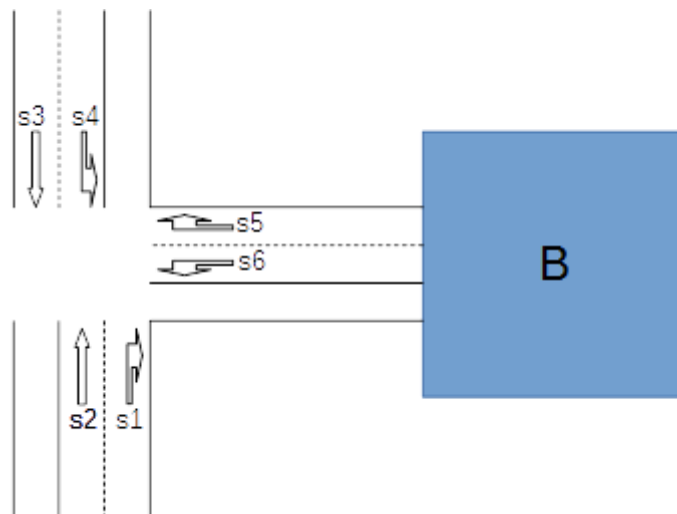
Op dit moment hebben we in het bepalen van de belasting van een signaalgroep alleen rekening gehouden met het verkeersaanbod en de verwerkingscapaciteit van de betreffende richting. Het algoritme is, anders gezegd, alleen gericht op de afwikkeling van het verkeer. We zouden echter ook op kosten kunnen sturen om zo het economische verlies te beperken. Later zal hier een voorbeeld van worden getoond.

De toepassing zoals die hier beschreven wordt, heeft meer effect naarmate de samenstelling van de verkeersstromen op een gegeven kruispunt sterker gedifferentieerd is. Zo'n situatie zou kunnen voorkomen op een kruispunt dat een bedrijventerrein verbindt aan een rondweg: de verkeersstromen vanaf en richting het bedrijventerrein zullen overdag vooral bestaan uit zakelijk verkeer en daarmee, gezien de hoge kosten voor vertraging in deze categorie zoals we die eerder zagen, meer 'voorrang' krijgen ten opzichte van de andere stromen. Hoewel dit potentieel leidt tot een positief economisch effect en toegenomen prestaties (zie 4.1.2.2), heeft het een negatieve invloed op de geloofwaardigheid (zie 4.1.2.3) van de regeling. Dit is een mooi voorbeeld van hoe een verkeersmaatregel effect heeft binnen het spanningsveld van veiligheid, prestaties en geloofwaardigheid. Hoe sterk deze effecten zijn zal worden bepaald door de kracht van de ingreep en de aanvaardbaarheid hiervan zal moeten worden beoordeeld door de wegbeheerder.

12.1.2 Voorbeeld

Hierboven hebben we gezien dat het algoritme kan sturen op vertragingkosten in plaats van op vertragingstijd door een aantal onderdelen van de oplossing licht aan te passen. Dit is geïllustreerd in onderstaand voorbeeld.

De situatie is als volgt: een bedrijventerrein B dat veel zakelijk verkeer genereert is via een T-splitsing met verkeerslichten aangesloten op de ringweg van een stad.



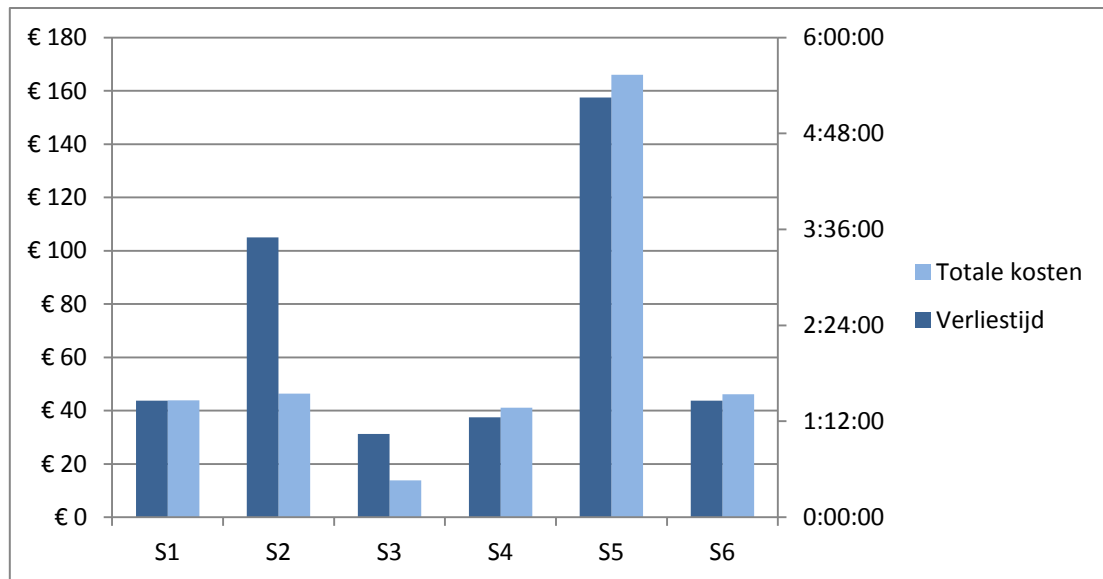
Figuur 23 – Voorbeeldsituatie

De samenstelling van de verkeersstromen op het gekozen tijdstip is als volgt:

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Zakelijk	70%	10%	10%	80%	75%	75%
Woon-werk	15%	50%	50%	10%	20%	20%
Overig	15%	40%	40%	10%	5%	5%
Belastinggraad	0,7	1,2	0,5	0,6	1,4	0,7

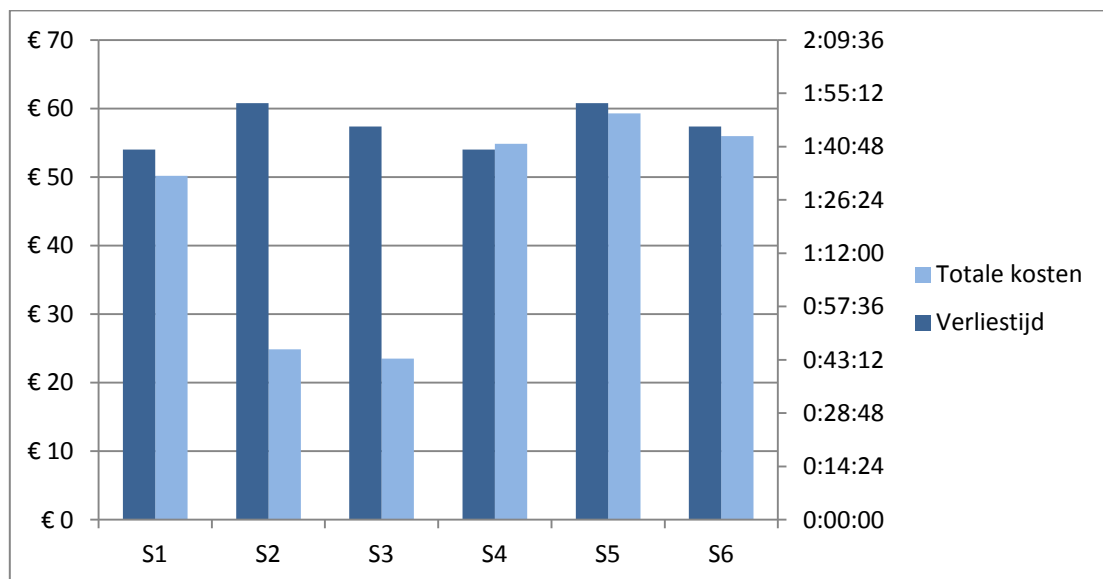
Tabel 5 - Samenstelling verkeersstromen

We gaan er hier voor het gemak even vanuit dat alle richtingen onderling in conflict zijn en dus achtereenvolgens groen krijgen. In Tabel 5 is te zien dat de richtingen S2 en S5 momenteel kampen met overbelasting. Als we de gemiddelde wachttijd gaan schatten en aan de hand van de samenstelling van de verkeersstromen de kosten gaan berekenen, komen we op de volgende grafiek:



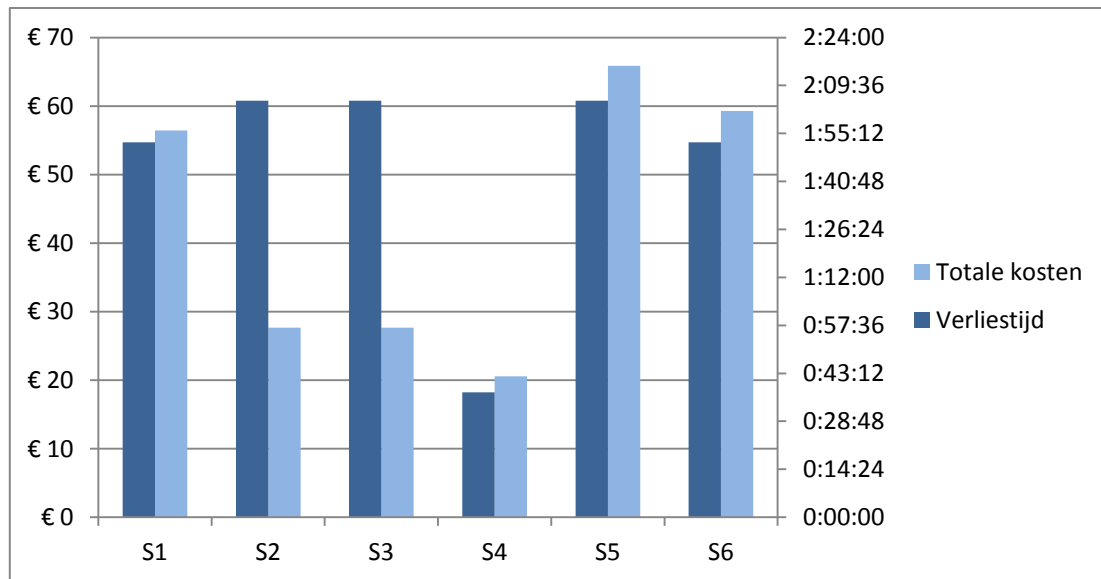
Figuur 24 - Verliestijd en kosten voor optimalisatie

Hierin is te zien dat de richtingen met de grootste totale verliestijd (voertuigverliesuren per uur), S2 en S5, een groot verschil laten zien in de verliestijd/kosten verhouding. Zouden we het ontwikkelde algoritme op deze situatie loslaten, dan zou dat ongeveer de volgende situatie teweeg brengen op ons kruispunt:



Figuur 25 - Na normale optimalisatie

Hierin is te zien dat de verliestijd per richting wordt uitgevlakt over alle signaalgroepen. De totale kosten over alle verkeersstromen is in deze situatie ongeveer €268 per uur. Als we bij de parameteroptimalisatie rekening gaan houden met de kosten in plaats van de vertraging, dan komt de grafiek er wat anders uit te zien:



Figuur 26 - Na kostenoptimalisatie

Hier is goed te zien dat signaalgroep S4 in verhouding de duurste is (dat wil zeggen, een groot aandeel zakelijk verkeer). De belasting hiervan is laag gehouden door de groentijd op te rekken en er daarmee voor te zorgen dat veel voertuigen niet of slechts kort hoeven te stoppen. De kosten in deze situatie zijn gedaald ten opzichte van die in Figuur 25 naar €257. Het is hierbij belangrijk om aan te merken dat het niet loont om andere richtingen in een overbelastingssituatie te brengen om de dure richting te ontzien, aangezien dubbele stops, die onvermijdelijk zouden ontstaan, duurder zijn dan de behaalde winst op de andere richtingen.

Bovenstaande grafieken illustreren dat een optimalisatie op kosten een goede mogelijkheid is om de economische efficiëntie van een verkeersregeling te verbeteren. Zoals eerder aangehaald kan dit echter ten koste gaan van de wachttijd op richtingen die kostentechnisch minder meewegen en daarmee de geloofwaardigheid van de weggebruiker aantasten. Bovendien moet goed worden uitgekeken voor het onbedoeld creëren van overbelasting op 'goedkope' signaalgroepen.

12.2 Gemoed van de verkeersdeelnemer

Buiten het economische effect van verkeersopstoppingen en de daardoor veroorzaakte vertragingen is het niet ondenkbaar dat er ook invloeden waarneembaar zijn op de bestuurders zelf. Van een uur filerijden wordt (bijna) niemand blij, maar wat zijn dan wél de effecten?

12.2.1 Effecten op de gemoedstoestand

In 1978 hebben vier Amerikaanse onderzoekers een quasi-experimentele studie [26] uitgevoerd om de effecten van routinematige blootstelling aan verkeerscongestie op het gemoed, de fysiologie en taakprestaties van forensen te onderzoeken. Zoals te verwachten ervaren automobilisten die aan hogere maten van congestie werden blootgesteld dit als vervelender dan zij die te maken kregen een mildere vorm van congestie. De automobilisten werden geclassificeerd als Type A (vijandig, ongeduldig, competitief) of Type B (rustig, kalm). Uit een eerder onderzoek in 1950 is gebleken dat Type A-mensen een significant hogere kans hebben op ischemische hartproblemen ten opzicht van mensen in de Type B-categorie. In [26] staat ook beschreven dat automobilisten die in dit experiment waren ingedeeld in de A-categorie een waarneembaar hogere bloeddruk hadden (zowel onder- als bovendruk).

Een vergelijkbare studie [27] is in 1999 uitgevoerd door twee onderzoekers van de York University in Ontario. Zij interviewden automobilisten tijdens een enkele woon-werkreis en signaleerden indicatoren van stress en rijgedrag. Hun waarnemingen bevestigden hun hypothese, namelijk dat automobilisten in verkeer met een hoge mate van congestie aanmerkelijk hoger scoorden op agressie en stress dan in rustige verkeerssituaties.

De Australische firma AAMI heeft in 2005 een enquête [28] gehouden onder verkeersdeelnemers in Sidney. Hierin gaf 70% van de ondervraagden te kennen dat ze denken dat verkeerscongestie een belangrijke oorzaak is van agressie in het verkeer. Het is opmerkelijk dat de meeste bestuurders (60%) toegeeft zich gehaast door het verkeer te begeven, maar dat slechts 15% zichzelf een ongeduldige verkeersdeelnemer vindt.

12.2.2 Consequenties

De aangehaalde onderzoeken laten een gemeenschappelijk beeld zien: verkeerscongestie leidt tot stress en agressie.

Een aggregatiestudie van de Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeer in [29] laat zien dat verkeersagressie kan leiden tot gevaarlijk rijgedrag zoals sneller rijden dan toegestaan en bumperkleven. In dagboekonderzoeken onder verkeersdeelnemers is te lezen dat bijna-ongelukken veel vaker plaatsvinden als de bestuurders gestrest zijn.

Daarnaast toont de studie in [26] aan dat verkeerscongestie leidt tot Type-A-gedrag en daardoor ook een oorzaak kan zijn van ischemische hartproblemen.

12.3 Samengevat

Aan de hand van de onderzoeken en cijfers die aangehaald zijn in dit hoofdstuk kunnen we concluderen dat verkeerscongestie maatschappelijk nadelig is op twee manieren. Ten eerste zijn er de kosten die verliestijd met zich mee brengt. Deze kosten verschillen per reisdoel (woon/werk, zakelijk, recreatief) en het zou mogelijk moeten zijn om een verkeersnetwerk te optimaliseren om de kosten van vertraging te minimaliseren. Hiervoor is wel extra informatie noodzakelijk, namelijk de samenstelling van verkeersstromen in het netwerk op verschillende tijdstippen.

Naast de kosten is er ook een toename van agressie en daarmee onveiligheid waarneembaar in verkeer dat zich in een staat van congestie bevindt. Deze onveiligheid zorgt in potentie voor verkeersongelukken en daarmee en nog verder toenemende vertraging. Daarnaast zijn stress en agressie in het verkeer factoren die kunnen bijdragen aan het ontwikkelen van hartproblemen en alle maatschappelijke kosten en persoonlijke problemen die daarmee gepaard gaan.

Bovendien lijkt het er op dat we uit de onderzoeken kunnen concluderen dat verkeersagressie een positieve feedbackloop vormt: verkeerscongestie leidt tot agressie en gevaarlijk weggedrag, en dit leidt weer tot een toename in de congestie.

13 Resultaten en conclusie

De vraag die we ons hebben gesteld aan het begin van dit onderzoek was of het mogelijk was een methode te ontwerpen die zonder veel maatwerk en configuratie toepasbaar zou zijn op een bestaand verkeersnetwerk om congestiesituaties te voorkomen en op te lossen of te verminderen. Ook waren we geïnteresseerd in de voordelen van een dergelijk systeem.

Om te beginnen hebben we ter algemene ontwikkeling een inzicht proberen te krijgen in de verkeerswereld. Zo bleek het spanningsveld tussen prestaties, veiligheid en geloofwaardigheid vaak een belangrijke rol te spelen bij beslissingen en hebben we gekeken naar verkeerskundige grootheden als dichtheid, intensiteit en belasting. Daarnaast is er een model ontwikkeld om te kunnen praten en redeneren over verkeersnetwerken op een manier die aansluit bij ons onderzoeksdoel. Aan de hand van dit model en de eerder opgestelde definities over verkeerskundige grootheden hebben we voorspellingen kunnen doen voor de verkeersintensiteit op verschillende plekken in een willekeurig verkeersnetwerk.

Daarnaast hebben we gekeken naar de mogelijkheden om verkeersregelininstallaties te beïnvloeden op een manier die toepasbaar is op bestaande installaties en mogelijkheden bieden om verkeerssituaties in het netwerk te veranderen of bij te sturen. De maximumgroentijd was van deze instellingen de enige parameter die geschikt bleek voor een dergelijk doel en dus hebben we geanalyseerd wat het effect is van veranderingen van deze parameter en waarom dat zo is. De belangrijkste vinding hiervan was dat het instellen van de waarde liever te hoog dan te laag kan gebeuren, aangezien een te lage waarde een sterk negatief effect heeft op de prestaties van de betreffende signaalgroep. Verder kan de maximumgroentijd hoger worden ingesteld bij een hogere verkeersintensiteit om dubbele stops van wachtend verkeer te voorkomen.

Aan de hand van het ontwikkelde verkeersmodel hebben we verwachtingen kunnen formuleren over de toekomstige intensiteit op signaalgroepen in het verkeersnetwerk. Hoe dichterbij het te voorspellen moment ligt, hoe preciezer de voorspelling gedaan kan worden. Aan de hand van deze berekeningen kunnen we congestiesituaties zien aankomen en daar op inspelen door het instellen van nieuw te bepalen waarden voor de maximumgroentijdparameters in het netwerk. Door de afvoercapaciteit van overbelaste signaalgroepen te verhogen en die van aanvoerende signaalgroepen te verlagen kunnen we de belasting spreiden en zo overbelasting op één punt verminderen of zelfs voorkomen. Het uitgangspunt hiervan is dat een situatie waarin één verkeersdeelnemer hinder ondervindt minder wenselijk is dan een situatie waarin meerdere deelnemers de hinder delen.

Tot slot is een prototype ontworpen en geïmplementeerd dat het ontworpen algoritme kan toepassen op een verkeersnetwerk. Omdat het inrichten van een testomgeving realistisch gezien niet binnen de scope van dit onderzoek te houden viel, is samen met IT&T besloten dit uit te voeren op een later tijdstip.

Verder is er onderzoek gedaan naar de mogelijke maatschappelijke impact van de ontwikkelde oplossing. Uit eerder onderzoek bleek dat verschillende verkeerscategorieën (zakelijk, woon-werk, overig) andere kosten met zich meebrengen wanneer ze vertraagd worden door drukte op de weg. Wanneer er in een verkeersnetwerk een schatting kan worden gemaakt van de samenstelling van de verkeersstromen met betrekking tot deze categorieën, kan er worden gestuurd op vertragingkosten in plaats slechts de vertragingstijd. Bij grote verschillen in de samenstelling van verkeersstromen kan dit echter leiden tot een gevoel van onrechtvaardigheid bij automobilisten in de 'goedkope' categorie, wat een negatief effect heeft op de geloofwaardigheid van de regeling.

Anderzijds blijkt een toename in verkeersdrukke en daarmee de vertraging van de individuele verkeersdeelnemer een persoonlijk effect hebben. Mensen raken gestrest, wat een negatieve invloed heeft op hun gezondheid, maar krijgen ook de neiging tot het vertonen van agressief en gevaarlijk rijgedrag. Doordat dit gedrag leidt een onvoorspelbaar verkeersbeeld en daarmee tot meer vertraging, tekent zich hier een positieve feedbacklus uit.

14 Verder onderzoek en uitbreiding

In dit onderzoek is een manier gepresenteerd om bestaande verkeersregelininstallaties te betrekken in een optimalisatiealgoritme dat nieuwe parameterinstellingen bepaalt aan de hand van actuele loginformatie die door het kruispunt zelf wordt geproduceerd. Een probleem hierbij is dat deze loginformatie slechts per minuut (of langer, afhankelijk van de instelling van de installatie) beschikbaar wordt gemaakt. Hierdoor kan het algoritme slechts eenmaal in zo'n periode nieuwe waarden berekenen. Dat zorgt ervoor dat niet misschien niet elke cyclus gebruikt maakt van optimale instellingen. Ook beperkt dit de functionaliteit van het algoritme indien er een korte reistijd tussen twee kruispunten bestaat. Een mogelijke oplossing hiervoor is het realtime doorgeven (streamen) van de loginformatie. Voorheen was dit onmogelijk omdat VRI's slechts bereikbaar waren via een inbelverbinding en er dus geen continue communicatie mogelijk was. Tegenwoordig worden de meeste installaties echter uitgerust met ADSL of een andere verbinding die een dergelijke functionaliteit wél mogelijk maakt. Omdat de mogelijkheden hiervoor nog worden onderzocht, staat het niet vast hoe dit exact gaat werken. Om die reden is dit nog niet meegenomen in dit onderzoek, maar in de toekomst kan het mogelijk een flinke verbetering opleveren voor de functionaliteit van het gepresenteerde optimalisatiealgoritme.

Zoals eerder genoemd in paragraaf 8.3 is ook dynamische modulestructurering een onderwerp wat een goede uitbreiding zou zijn voor het algoritme. Door meer vrijheid te krijgen in het indelen van de volgorde van de signaalgroepen is het mogelijk om een groter effect te bewerkstelligen dan met alleen de maximumgroentijdparameter. Een drukke richting kan bijvoorbeeld meerdere malen per cyclus worden gerealiseerd wat een veel hogere verkeersverwerkingscapaciteit (op die richting) tot gevolg zou hebben.

In het algoritme-ontwerp wordt het ATB-algoritme gebruikt om de basiswaarde voor de maximumgroentijdparameter vast te stellen. Dit algoritme maakt geen onderscheid tussen verschillende belastinggraden zoals Optimax (zie 8.1.2) dat wel doet. Wellicht is er nog winst te behalen door Optimax te gebruiken voor het bepalen van de basiswaarden na het berekenen van de verwachte intensiteit per richting.

Een andere mogelijke uitbreiding zou het prioriteren van bepaalde signaalgroepen in het netwerk kunnen zijn. Hiermee zouden wegbeheerders ondanks het autonoom draaiende algoritme toch enige vorm van controle kunne uitoefenen op de bijsturing door de verkeersregelininstallaties. Er zou kunnen worden aangegeven dat overbelasting op de ene signaalgroep zwaarder meeweegt dan de

andere, wat bijvoorbeeld handig kan zijn bij het knippen van verkeersstromen van of naar gebieden die niet meer binnen het door het algoritme bestuurd netwerk vallen.

15 Bijlage A – Bedrijfsbeschrijving IT&T

15.1 IT&T

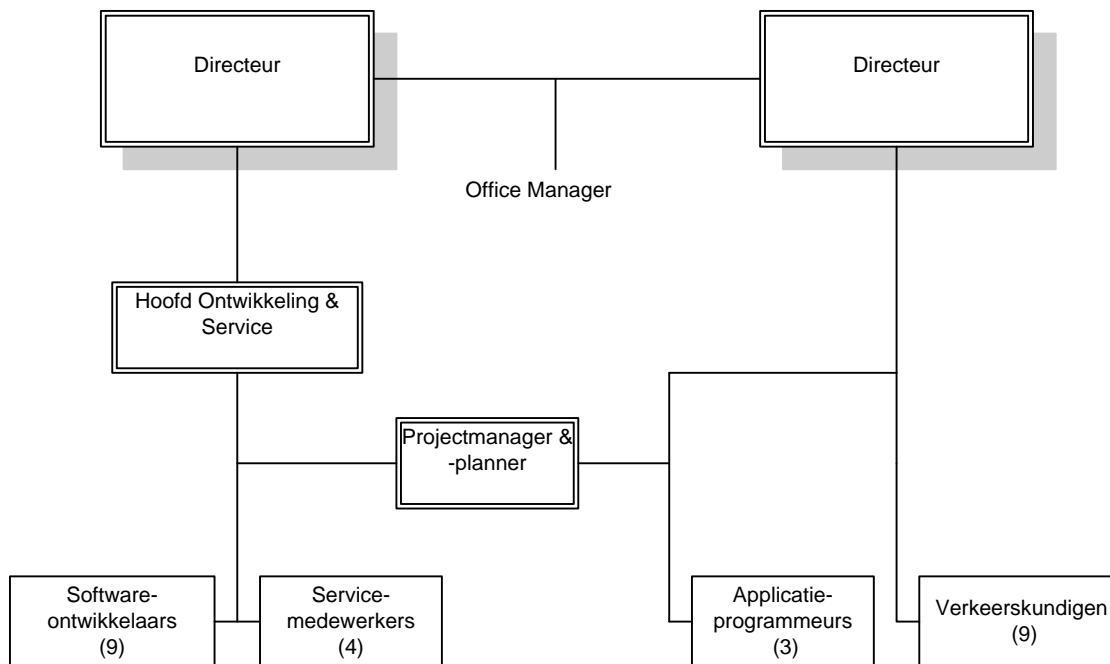
Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van een Master Informatica in opdracht van IT&T te Elst. Het bedrijf bestaat sinds 2002 en opereert op het snijvlak van verkeerskunde en informatietechnologie. De gehanteerde kernwaarden zijn innovatie, kwaliteit en persoonlijk contact [3]. In de 12,5 jaar dat het bedrijf bestaat is het aantal werknemers gegroeid naar 30 en is het verhuisd naar een nieuwbouwpand in Elst (Gelderland).



Figuur 27 - Ontwikkeling IT&T [3]

15.1.1 Structuur

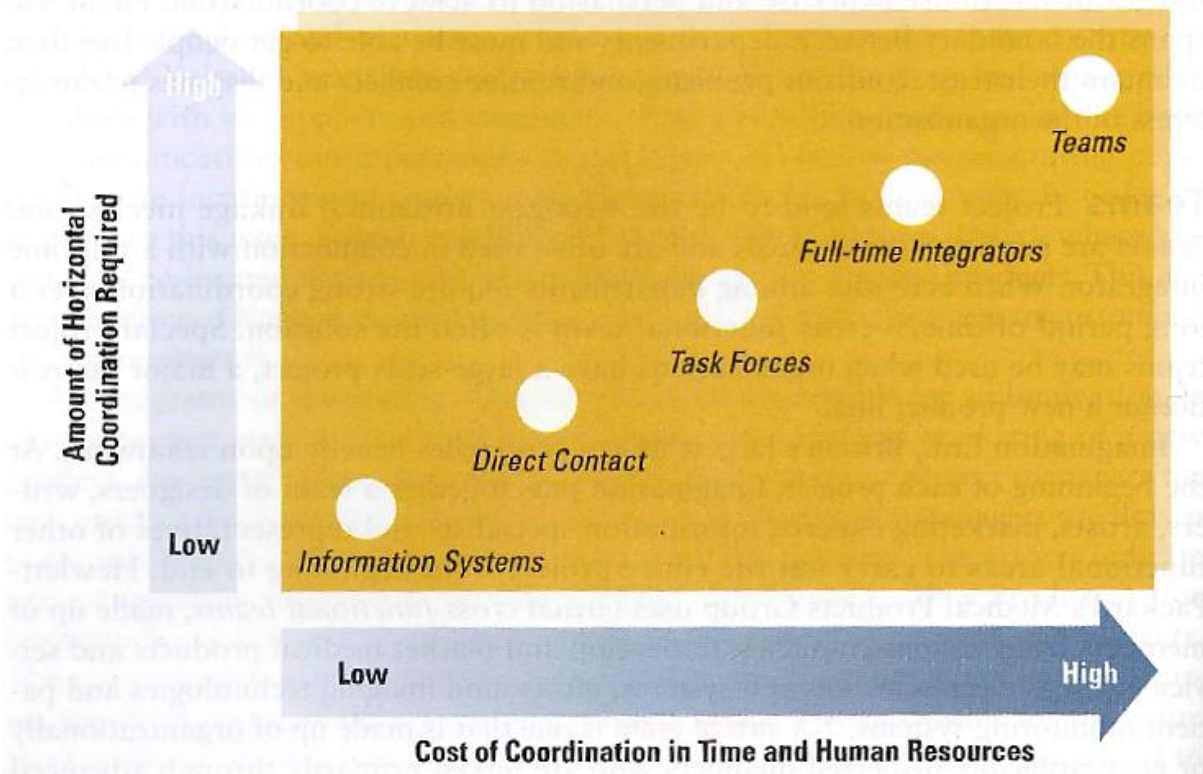
Het bedrijf staat op drie poten: softwareontwikkeling en -ondersteuning, verkeersconsultancy en applicatieprogrammering. Deze drie delen worden aangestuurd door een tweekoppige directie die wordt ondersteund door een office manager. Elke directeur heeft een duidelijk deel van het bedrijf onder zijn hoede maar werkt nauw samen met de ander in de dagelijkse werkzaamheden.



Figuur 28 - Organigram IT&T

In Figuur 28 is duidelijk te zien dat het bedrijf zijn personeel groepeerd aan de hand van wat zij produceren. Er wordt (zoals vermeld in [4]) dus een divisionele structuur gehanteerd, te herkennen aan het groeperen van personeel aan de hand van de geproduceerde producten. Hierbij moet worden aangetekend dat het onderscheid met een functionele structuur niet groot is aangezien er weinig overeenkomsten bestaan tussen de werkzaamheden binnen de divisies. Naast deze structuur is er binnen de organisatie ook sprake van horizontale koppelingen tussen de afdelingen, met name tussen verkeerskundigen en de softwareontwikkelaafdeling. De eerstgenoemde afdeling vormt een belangrijke groep gebruikers van de software die wordt geproduceerd in het bedrijf en levert op regelmatige basis feedback over de ontwikkelde producten. Daarnaast worden verkeerskundigen vaak op losse basis (dat wil zeggen, wanneer dat nodig is) betrokken bij de ontwikkeling van software. Zij werken immers in hetzelfde beroepenveld als veel van de gebruikers van de software en kunnen daarom goed meedenken over de wensen van potentiële en bestaande klanten. Ook wordt op hen vaak een beroep gedaan wanneer de data-uitvoer van software gevalideerd moet worden. Deze samenwerking gebeurt op het niveau van *direct contact*, zoals dat wordt beschreven in [4].

EXHIBIT 3.4 Ladder of Mechanisms for Horizontal Linkage and Coordination



Figuur 29 - Mechanismen voor horizontale coördinatie [4]

15.1.1.1 Softwareontwikkeling

De softwaretak van het bedrijf is met 14 werknemers de grootste van de drie. Hier wordt software ontwikkeld die klanten ondersteunt door data uit verkeersregelininstallaties en andere bronnen te verwerken tot informatie op verschillende niveaus. Denk hierbij aan informatie op kruispuntniveau en aan software die bestuurders helpt hun beleid te formuleren, te toetsen en te evalueren. Op deze afdeling werken softwareontwikkelaars met verschillende specialismes samen in projecten en worden zowel de klanten als de interne processen ondersteund door de servicemedewerkers. De softwareprojecten worden gecoördineerd door een projectmanager en –planner die ook een groot deel van het contact met klanten verzorgt. Het geheel wordt aangestuurd door het hoofd van de afdeling die samen met de directeur daar boven (zie Figuur 28) ook de commerciële verantwoordelijkheid draagt.

15.1.1.2 Verkeersconsultancy

In deze tak van het bedrijf werken negen verkeerskundigen die vooral verkeerskundige analyses uitvoeren. Dit kan betekenen dat ze bijvoorbeeld de werking van een verkeerslichtenregeling analyseren of adviseren op het gebied van beleidsvorming. De coördinatie en planning voor deze

afdeling wordt verzorgd door een van de directeuren. De meeste werkzaamheden op deze afdeling vinden plaats in directe opdracht van klanten.

15.1.1.3 Applicatieprogrammering

De software die draait in verkeersregelininstallaties en op die manier alle verkeerslichten aanstuurt, moet afgestemd worden op de specifieke situatie zoals die geldt op het betreffende kruispunt. De applicatieprogrammeurs van IT&T dragen daar zorg voor. Vaak werken zij samen met een verkeerskundige om er voor te zorgen dat de kwaliteit van de geproduceerde regelapplicatie zo hoog mogelijk is. Ook hier vloeien alle werkzaamheden voort uit opdrachten van klanten.

15.1.2 Commissies

Binnen de organisatie bestaan een aantal commissies die zich richten op zaken die geen directe plaats hebben in de bedrijfsstructuur. Hierin komen medewerkers uit verschillende takken samen om een gezamenlijk richting en strategie voor PR, commercie en systeembeheer te organiseren.

15.1.3 Klanten

IT&T voert opdrachten uit voor overheden, voornamelijk gemeentes en provincies. Daarnaast wordt er ook gewerkt voor Rijkswaterstaat en een aantal commerciële partijen zoals het Havenbedrijf Rotterdam. Vaak voert het bedrijf opdrachten zelfstandig uit, maar in sommige gevallen wordt er samengewerkt met een derde partij.

16 Literatuur

- 1 Zuilichem, R.v.: 'Maximum groentijd, mag het iets meer zijn?', 2011
- 2 Wilson, A.: 'Handboek verkeerslichtenregelingen' (CROW, 2006. 2006)
- 3 <http://www.it-t.nl>, accessed 2013-02-04
- 4 Daft, R.L.: 'Organization Theory and Design' (CENGAGE Lmg Business Press, 2010. 2010)
- 5 H. Taale, S.H., M. van den Berg, B. de Schutter: 'Anticiperende netwerkgeregelingen', NM Magazine, 2006, 1, (4), pp. 22-27
- 6 <http://kunst-en-cultuur.infonu.nl/geschiedenis/35833-landtransport-in-het-romeinse-rijken-onderzoek.html>, accessed 02 2012
- 7 Grant, M.: 'History of Rome' (Prentice Hall, 1978. 1978)
- 8 Nederland, T.e.L.: 'Transport in cijfers', 'Transport in cijfers' (2011, edn.),
- 9 Verkeersveiligheid, S.W.O.: 'Werkelijke omvang doden en ernstig verkeersgewonden naar vervoerswijze en leeftijd' (2013, edn.), pp.
- 10 Verkeersveiligheid, S.W.O.: 'Kosten van verkeersongevallen', 'Book Kosten van verkeersongevallen' (2012, edn.), pp. 7
- 11 http://www.zondertransportstaatallesstil.nl/school/werkstuk_economie.asp, accessed 14-01-2014 2014
- 12 Rijkswaterstaat: 'Value of time: personenvervoer per auto' (2010, edn.),
- 13 Burgt, G.v.d.: 'Kort gesprek in januari 2013',
- 14 Webster, F.V.: 'Traffic Signal Settings' (Road Research Laboratory, 1958, edn.), pp.
- 15 S.p.A., M.A.: 'UTOPIA – Urban Traffic Control System Architecture' (2012, edn.), pp.
- 16 Katwijk, R.T.v.: 'Multi-Agent Look-Ahead Traffic Adaptive Control', Technische Universiteit Delft, 2008
- 17 Dale, V.: 'Kruising', (Van Dale, 2014, edn.),
- 18 CROW: 'Aanbevelingen voor verkeersvoorzieningen binnen de bebouwde kom' (CROW, 2004, edn.), pp.
- 19 al., L.e.: 'Capacity Drops At Merges: an endogenous model' (Elsevier Ltd., 2011, edn.), pp.
- 20 M. Cremer, T.H.: 'Estimation of queue lengths in urban road networks' (1993, edn.), pp. 29-35
- 21 Infrastructuur, G.V.: 'Afwikkeling eerste deel wachtrij', 2001
- 22 IVERA-protocol, S.B.: 'IVERA Functionele specificatie' (Stichting Beheer IVERA-protocol, 2008, edn.), pp.
- 23 IVERA-protocol, S.B.: 'IVERA Technische specificatie' (Stichting Beheer IVERA-protocol, 2008, edn.), pp.
- 24 Halpin, T.: 'ORM 2' (Neumont University, 2005, edn.), pp.
- 25 <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-uk/products/ptv-vissim/>, accessed 27-02-2013
- 26 al., D.S.e.: 'Traffic Congestion, Type-A Behavior and Stress' (Institute of Transportation Studies, 1978. 1978)
- 27 Dwigth A. Hennessy, D.L.W.: 'Traffic Congestion, Driver Stress, and Driver Aggression' (York University, 1999, edn.), pp.
- 28 AAMI: 'Traffic congestion fuelling aggression on our roads' (2005, edn.), pp.
- 29 http://www.swov.nl/rapport/Factsheets/UK/FS_Emotions_and_traffic.pdf