

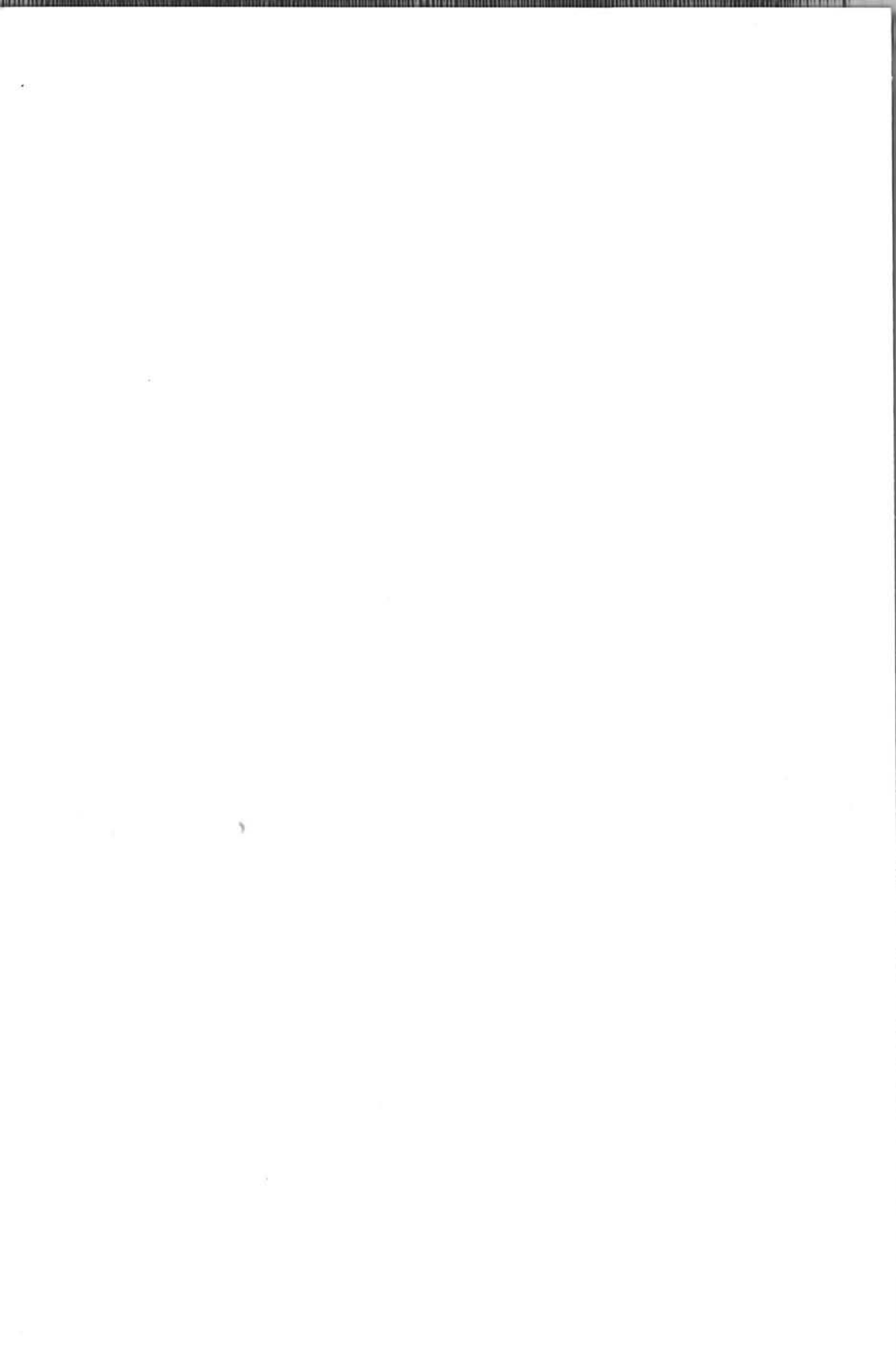
Lokale Treinverkeersregeling

F. Phillipson



WBBM Report Series 37

Delft University Press



74-26

Lokale treinverkeersregeling

Bibliotheek TU Delft



C 0003813891

WBBM
Delft University of Technology
Faculty of Information Technology and Systems
Department of Mathematics and Computer Science
Room ET 05.040
Mekelweg 4
2628 CD Delft, The Netherlands
Phone +31 15 278 16 35
Fax +31 15 278 72 55

Lokale treinverkeersregeling

F. Phillipson

Delft University Press, 1998

2414
553
3

The WBBM Report Series is published by:

Delft University Press
Mekelweg 4
2628 CD Delft, The Netherlands
Phone +31 15 278 32 54
Fax +31 15 278 16 61

Editors:

E. de Klerk
H. van Maaren

Delft University of Technology
Faculty of Information Technology and Systems
Department of Mathematics and Computer Science

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK DEN HAAG

Phillipson, F.

Lokale Treinverkeersregeling / F. Phillipson - Delft : Delft University Press. - Ill. -
(WBBM Report Series 37)
ISBN 90-407-1763-X
NUGI 841
Trefw.: Dienstregeling, Treinverkeer

Copyright ©1998 by WBBM, Delft University of Technology

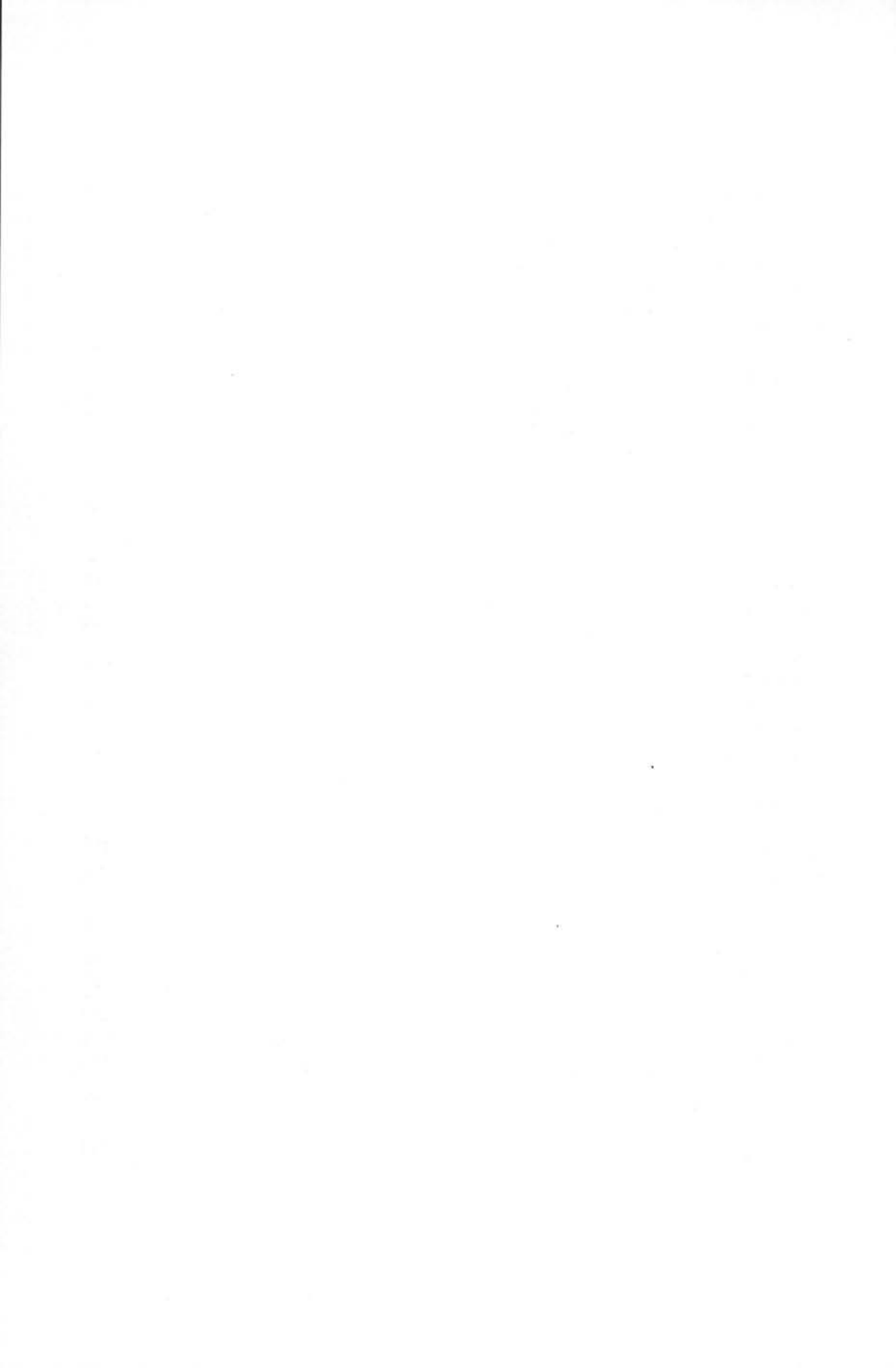
No part of this book may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means, without written permission from the publisher: Delft University Press, Mekelweg 4, 2628 CD Delft, The Netherlands.

Inhoudsopgave

1	Introductie	1
1.1	Railned	1
1.2	Basis	2
1.3	Referentiemodel	3
1.3.1	Definities	4
1.3.2	Besturingsniveaus	5
1.3.3	Uitvoeringsniveau	7
1.4	Conflict	7
1.4.1	Soorten	8
1.4.2	Oplossingen	9
1.5	Doelstelling	11
1.6	Beoordelingscriteria	12
1.7	Leeswijzer	13
2	Literatuur en Probleemclassificatie	15
2.1	Literatuurverkenning	15
2.1.1	Beslissingsondersteunende systemen	16
2.1.2	Control-regels	17
2.1.3	MARCO	20
2.1.4	DONS	21
2.1.5	Routing op stations	24
2.2	Classificatie	25
2.2.1	Modelleringsmogelijkheden	25
2.2.2	Klassen van oplosmethodes	27
3	Opzet modellering verkeersregeling	31
3.1	Communicatie	31
3.2	Informatie	32
3.3	Uitgangspunten	34
3.4	Ontwerp verkeersregeling	35
3.4.1	Inleiding	35
3.4.2	Uitwerking en taakverdeling	36
3.4.3	Conclusie	38

4	Conflictsignalering	41
4.1	Inleiding	41
4.2	Conflictdefinitie	42
4.3	Conflictkans	43
4.3.1	Notatie	43
4.3.2	Voorspellingen	45
4.3.3	Verdelingen	45
4.3.4	Aansluitingconflict	46
4.3.5	Infraconflict	51
4.4	Conclusie	54
5	Creëren nieuw verkeersplan	57
5.1	Driedeling	57
5.2	Modellering als clique-probleem	58
5.3	Opbouwen graaf	60
5.3.1	Beschouwing	61
5.3.2	Procedure	61
5.3.3	Alternatieven in tijd	62
5.3.4	Alternatieven in rijweg/perron	63
5.4	Kostenstructuur en Gewogen clique	63
5.4.1	Knoopgewichten	64
5.4.2	Takgewichten	66
5.4.3	Volgende verkeersregelpunten	69
5.4.4	Maximaal gewogen clique	70
5.5	Kwaliteit oplossing	72
5.6	Detecteringprobleem	72
6	Overzicht oplosmethoden	75
6.1	Kwadratisch programmeringsprobleem	75
6.2	Complexiteit	76
6.3	Methodes	76
6.3.1	GAMS	77
6.3.2	Semi Definite Programming (SDP)	78
6.3.3	Tailor-made Algoritme	83
6.3.4	Descent/Ascent methode	88
6.3.5	Simulated Annealing	90
6.3.6	Spectraal Algoritme	91
6.3.7	Conclusies	94
6.4	Post-processing	94

7 Resultaten	95
7.1 Testinstanties	95
7.1.1 Basisgegevens	95
7.1.2 Scenario's	96
7.2 Opbouwen graaf	99
7.2.1 Planhorizon	100
7.2.2 Implementatie	100
7.3 Testresultaten	101
7.3.1 Resultaten Scenario 1	101
7.3.2 Resultaten Scenario 2	102
7.3.3 Resultaten Scenario 3	103
7.3.4 Resultaten Scenario 4	104
7.4 Conclusie	105
8 Conclusie	107
8.1 Vorm	107
8.2 Toepasbaarheid	107
8.3 Modelling	108
8.4 Beoordeling	109
8.5 Conclusie en aanbeveling	109
Bibliografie	111
Samenvatting	115
A Railed	117
B Verkeersplan data	121
C Algoritmes	127
D Detail infrastructuur	129
E Voorbeeldgraaf	131
E.1 Kiezen alternatieven	131
E.2 Toekennen gewichten	132
E.2.1 Takgewichten	132
E.2.2 Knoopgewichten	132
E.3 Omrekenen	132
E.4 Alternatieven Scenario 3	133
Summary in English	145
Curriculum Vitae	153



Verantwoording

Dit rapport is het resultaat van het project dat is uitgevoerd in het kader van de tweejarige postdoctorale opleiding 'Wiskundige Beheers- en Beleidsmodellen'. Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van en in samenwerking met Railned B.V., de organisatie voor capaciteitsmanagement en spoorwegveiligheid. Begeleider vanuit Railned B.V. was dr. E.A.G. Weits.

Ter verkrijging van het certificaat 'Technologisch ontwerper' is dit rapport in het openbaar gepresenteerd en verdedigd, ten overstaan van een commissie, op woensdag 19 augustus 1998 om 15.00 uur te Delft. De examencommissie bestond uit:

- prof. dr. R.M. Cooke, Technische Universiteit, Delft
- ir. J.S. Hooghiemstra, Railned B.V., Utrecht
- dr. E. de Klerk, Technische Universiteit, Delft
- dr. H. van Maaren, Technische Universiteit, Delft (begeleider)
- ing. F. Makkinga, Holland Railconsult, Utrecht
- dr. J.H. van Schuppen, Centrum voor Wiskunde en Informatica, Amsterdam

Bij Railned B.V. wil ik in de eerste plaats Ello Weits bedanken voor de mogelijkheid een project bij Railned Innovatie uit te voeren en voor de hulp bij de totstandkoming van het onderzoek. Verder wil ik alle collega's van Innovatie bedanken voor de hulp bij het verzamelen van plaatjes en data, en voor de gezelligheid op de afdeling.

Ook wil ik mijn begeleiders van de TU Delft bedanken, Hans van Maaren het hele jaar, Michiel Odijk de eerste, belangrijke, maanden en Etienne de Klerk de laatste maanden.

Tot slot bedank ik hartelijk de twaio's en alle andere collega's op de TU, en in het bijzonder Milo, Petri, Marjanke en Linda, voor de gezellige praatjes, mailtjes en de etentjes in het tweede jaar.

Frank Phillipson
Delft, Augustus 1998



Hoofdstuk 1

Introductie

In dit eerste hoofdstuk zal de omgeving van het project worden geschetst. Aangezien dit project deel uitmaakt van een groter geheel, BASIS¹ genaamd, zal getracht worden de lezer een beeld te geven van BASIS en van enkele essentiële begrippen uit BASIS die in dit project een rol spelen. Verder wordt een inventarisatie gemaakt van de conflicten die kunnen optreden bij uitvoering van het verkeersplan voor het treinverkeer en de maatregelen die genomen kunnen worden om deze conflicten op te lossen. Aan het einde van dit hoofdstuk, in de laatste twee paragrafen, zal de doelstelling van dit project uiteengezet worden. Nu eerst zal de organisatie Railned B.V. worden voorgesteld.

1.1 Railned

De organisatie Railned B.V. is opgericht om het gebruik van de Nederlandse railinfrastructuur te optimaliseren, nu en in de toekomst. Bovendien bewaakt Railned de spoorwegveiligheid in Nederland. Railned is een juridisch zelfstandige organisatie. Ze werkt, in opdracht van het ministerie van Verkeer en Waterstaat, objectief en onafhankelijk voor alle vervoerders op het Nederlandse spoorweginet, inclusief nieuwe railgebruikers.

In Europees verband is afgesproken dat het internationale spoorwegvervoer geliberaliseerd wordt. Onder meer wordt dit bereikt door de spoorweginfrastructuur open te stellen voor meer vervoerders dan nu het geval is. Er moet concurrentie mogelijk worden. In die lijn is gezegd dat de spoorwegmaatschappijen zich moeten concentreren op de vervoersfunctie. De landelijke overheden worden verantwoordelijk voor de infrastructuur. Deze verantwoordelijkheid houdt in dat de Rijksoverheid aangesproken kan worden op de beschikbaarheid van spoorweginfrastructuur, het gebruik ervan en de staat van onderhoud. Het regelen van het gebruik van de infrastructuur heeft de overheid gedelegeerd aan Railned. De overheid houdt wel een dikke vinger in de pap. Zij betaalt de infrastructuur, financiert Railned, stelt de toedelingsprincipes vast waarmee Railned werkt en regelt de toezicht op de toedeling van de capaciteit van de infrastructuur. De Rijksoverheid is ook de instantie die de licentie afgeeft waarmee vervoerders toegang tot het spoorweginet krijgen.

¹de afkorting BASIS staat voor Beleid en Aanpak voor SIMulatie Studies

Vervoerders kunnen alleen zaken met Railned doen als zij in het bezit zijn van een licentie uit Den Haag.

De hoofdtaken van Railned zijn:

- **capaciteitsmanagement** – De spoorweginfrastructuur kan worden gebruikt door verschillende partijen. Vervoerders van reizigers en goederen vragen capaciteit op het railnet. Bovendien moet ook voor onderhoud capaciteit worden vrijgemaakt. Dat kan tot onverenigbare wensen leiden. Capaciteitsmanagement treedt dan ook niet alleen op als scheidsrechter, maar dient deze conflicten ook te kunnen beheersen. Dat doet Railned enerzijds door haar rol in de toedeling van de capaciteit, anderzijds door beïnvloeding van de beschikbare capaciteit. Railned prognosticeert de toekomstige behoefte aan railverkeer en doet voorstellen aan het ministerie van Verkeer en Waterstaat om de Nederlandse railinfrastructuur aan te passen door fysieke uitbreiding of door innovatieve maatregelen. Het capaciteitsmanagement wordt door twee organisaties uitgevoerd: Railned is verantwoordelijk tot en met 24 uur voor het vertrek van een trein en voor de dagelijkse gang van zaken neemt NS Verkeersleiding deze taak over.
- **spoorwegveiligheid** – Sinds jaar en dag staat veiligheid hoog in het vaandel bij de wetgever en bij het spoorwegbedrijf. Namens de overheid fungeert Railned als een onafhankelijke veiligheidsinstantie. Elementen van die taak zijn regelgeving, doorlichting en onderzoek van ongevallen.

Meer informatie over de structuur van Railned B.V. is te vinden in de Bijlage A.

1.2 Basis

In het voorjaar van 1997 is het simulatieproject BASIS (Beleid en Aanpak voor SIMulatie Studies) gestart². Deelnemers zijn de taakorganisaties Railned, NS Railinfrabeheer en NS Verkeersleiding. Deze drie organisaties hebben als taak het optimaliseren van het gebruik van de infrastructuur, het aanleggen en instandhouden van de infrastructuur, het realiseren van de capaciteitsuitbreiding en het regelen van het treinverkeer. Bij het uitvoeren van deze taken speelt het begrip kwaliteit van het railverkeersproces een belangrijke rol. Met een beoordeling van deze kwaliteit wordt indirect ook een oordeel gegeven over de kwaliteit van de verkeersmiddelen als dienstregeling, infrastructuur en materieel en over de verkeersregeling. Het beoordelen is tot op heden gebaseerd op gevoel en ervaring. Vandaar dat er behoefte is aan een methode waarmee de kwaliteit van het railverkeersproces objectief vastgesteld kan worden.

Een probleem bij het vaststellen van de kwaliteit van het railverkeersproces is dat er geen eenduidige definitie van kwaliteit is. Er kan hierbij worden gedacht aan begrippen

²BASIS wordt uitvoerig beschreven in Middelkoop [22]

als uitvoerbaarheid, betrouwbaarheid, stabiliteit en punctualiteit. Het komt in ieder geval neer op de mate waarin verstoringen in het railverkeer kunnen worden opgevangen of weggewerkt. Door de vele afhankelijkheden die binnen het railverkeerssysteem gelden, wordt al snel het zicht verloren op de gevolgen en de oorzaken van de verstoringen. Anders gezegd wordt gezocht naar een methode waarmee de dynamische aspecten van het railverkeersproces zichtbaar kunnen worden gemaakt. Aangezien analytische methoden (nog) niet beschikbaar zijn, lijkt simulatie het aangewezen gereedschap.

Hoewel simulatie van het railverkeersproces of onderdelen daarvan al enige tijd toegepast worden binnen het NS-concern, verloopt de uitvoering en evaluatie van zulke studies moeizaam. Succesvolle inzet vereist gezamenlijke opbouw van kennis en inzicht in de hierbij te hanteren werkwijze. Het project BASIS levert een handleiding, waarin aangegeven wordt hoe relevante probleemsoorten aangepakt moeten worden om de kans op succesvolle oplossing ervan met behulp van inzet van simulatie zo groot mogelijk te maken.

Het project BASIS kent in de eerste fase twee doelen:

- inventarisatie van problemen waarvoor simulatie van de treindienst zinvol is alsmede een inventarisatie van bijbehorende beoordelingscriteria.
- vaststelling van opzet van de modellering van de treindienst t.b.v. toekomstige implementatie.

Onder dit tweede punt valt het ontwikkeling van een referentiemodel, dat het onderwerp is van de volgende paragraaf.

In de tweede fase wordt de methodiek verder ontwikkeld, geïmplementeerd en aangevuld met hulpmiddelen.

De fasen zijn verdeeld in deelprojecten, allen met een ander karakter. Zo zijn er de deelprojecten: ontwikkeling referentiemodellen, ontwikkeling generieke aanpak simulatiestudies, definitie probleemsoorten etc.

1.3 Referentiemodel

Binnen het beschreven project BASIS (zie sectie 1.2) bestaat deelproject 3 uit het vaststellen van referentiemodellen³. Een referentiemodel is een startpunt en standaard bij het ontwerpen van elk conceptueel model, de modellering van het railverkeer voor een specifiek probleem. Voor het beschrijven van referentiemodellen heeft de projectgroep gekozen voor een object-georiënteerde aanpak. Voor het vervolg is het handig eerst enkele definities te geven voor een overzicht van de gebruikte objecten in de modellering. Vervolgens wordt in deze paragraaf de modellering van de besturing van het treinverkeer vastgesteld, zoals dat beschreven wordt in het referentiemodel.

³zie Weits en anderen [11] voor uitgebreide documentatie

1.3.1 Definities

In het referentiemodel zijn een aantal begrippen gedefinieerd. Deze begrippen worden in deze paragraaf gepresenteerd, zodat ze in het vervolg van dit rapport gebruikt kunnen worden.

Definitie 1 Verkeersregelpunt – *In de praktijk wordt met het begrip dienstregelpunt knooppunten van infrastructuur bedoeld waarvoor een aankomst en/of vertrektijd bekend is voor een rit. Voorbeelden van dienstregelpunten zijn stations, knooppunten en bruggen. In de modellering van BASIS wordt over een dienstregelpunt het object verkeersregelpunt gelegd. Dit object kent zijn toestand wat betreft infrastructuur en huidige treinenloop.*

Definitie 2 Bereikbaarheid – *Het object bereikbaarheid is een verbinding tussen twee I/U-punten. Indien het twee verkeersregelpunten verbindt heet dit een globale bereikbaarheid, wat ook wel vrije baan wordt genoemd. Indien het zich binnen een dienstregelpunt bevindt heet het een lokale bereikbaarheid, ook wel rijweg genoemd. Een bereikbaarheid weet welke ritten er in welke volgorde over hem rijden.*

Definitie 3 Verkeersregelgebied – *Het verkeersregelgebied is een verzameling verkeersregelpunten met tussengelegen globale bereikbaarheden.*

Definitie 4 Verkeersplan – *Een verkeersplan bevat als attribuut een verzameling planregels. De planregels bestaan uit verzamelingen paden die gereden zullen worden door ritten, de aansluitrelaties tussen die ritten en de punctualiteit⁴ van die ritten. De planregels hoeven niet geheel aanwezig te zijn, maar kunnen dynamisch worden opgebouwd tijdens de simulatie. Er wordt onderscheid gemaakt tussen een globaal verkeersplan en de lokale verkeersplannen. Het object verkeersplan is verantwoordelijk voor het actueel houden van de planregels en voor het signaleren van conflicten bij het bijbehorende gebied⁵.*

Definitie 5 Verkeersregelaar – *Het object verkeersregelaar beheert een verkeersregelgebied. Hij lost problemen op in zijn verkeersregelgebied en zorgt voor een optimale bijsturing van het treinverkeer in zijn verkeersregelgebied door wijzigingen door te geven aan het object verkeersplan.*

Definitie 6 Rit – *Het object rit is de abstracte verplaatsing van een beginstation naar een eindstation en wordt geïnitieerd door het verkeersplan. Voor het uitoefenen van een rit zal altijd het object trein (bestaande uit een of meer treinstellen) nodig zijn. Een rit zal ontstaan bij het beginstation en verdwijnen bij het eindstation, terwijl de fysieke trein al bestond en zal blijven bestaan. Omdat de rit het beste de omstandigheden van de trein kent, zal de rit voorspellingen doen over aankomst- en vertrektijden, met een bepaalde onzekerheid.*

⁴ook wel passagetijden genoemd

⁵voor het lokale verkeersplan is dat een verkeersregelgebied, voor het globale verkeersplan het hele gebied waarover wordt gesimuleerd

Hierbij dient te worden opgemerkt dat wanneer er in het vervolg wordt gesproken over het aanpassen of creëren van het lokale verkeersplan door de lokale verkeersregelaar, bedoeld wordt dat de lokale verkeersregelaar wijzigingen in de planregels of nieuwe planregels doorgeeft aan het lokale verkeersplan, die deze wijzigingen in zijn planregels doorvoert.

1.3.2 Besturingsniveaus

In aansluiting bij de praktijk wordt in het referentiemodel gekozen voor besturing van het railverkeer op twee niveaus. Deze twee niveaus kunnen worden aangeduid als:

1. herplannen (een globale activiteit)
2. bijregelen en bijstellen plan (een lokale activiteit)

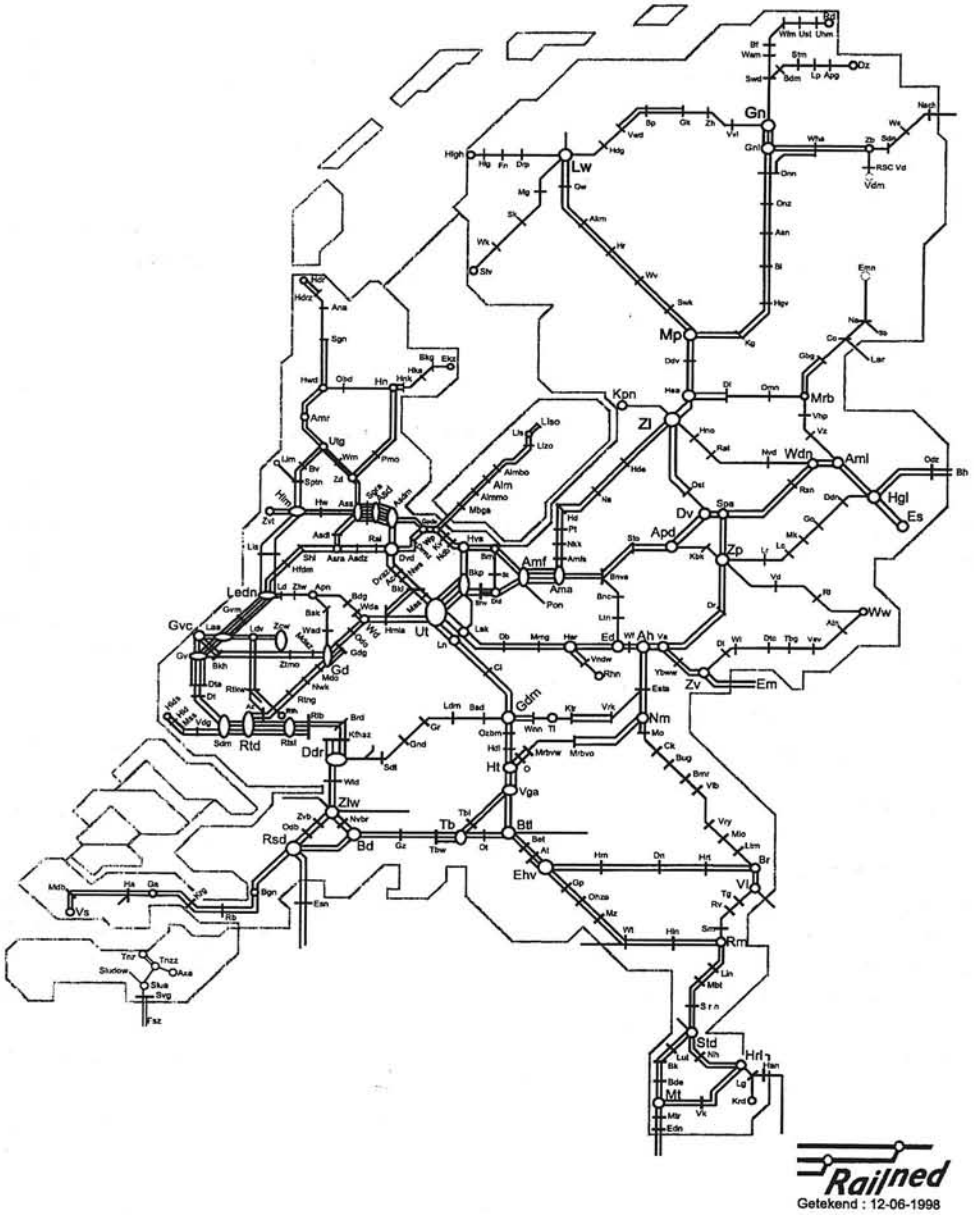
Op deze twee niveaus zijn verschillende bestuurders actief, met elk hun eigen taken en verantwoordelijkheden

Op het eerste niveau opereert de globale verkeersregelaar. Hij heeft een globaal beeld van de infrastructuur, bestaande uit verkeersregelpunten en globale bereikbaarheden (zie figuur 1.1 voor een voorbeeld voor het hele land). De globale verkeersregelaar draagt zorg voor de afhandeling van grote verstoringen, bepaalt de inzet en globale route van de ritten en maakt zijn wensen over aansluitingen en punctualiteit kenbaar in het globale verkeersplan. Het globale verkeersplan bevat, naast de gewenste aansluitingen en punctualiteiten, de globale route van de ritten, dat wil zeggen een (partiële) rij van globale bereikbaarheden en bijbehorende tijden of tijdsvensters. De globale verkeersregelaar mag wijzigingen aanbrenge in de planregels van het globale verkeersplan, zoals het inleggen, opheffen of omleiden van treinen.

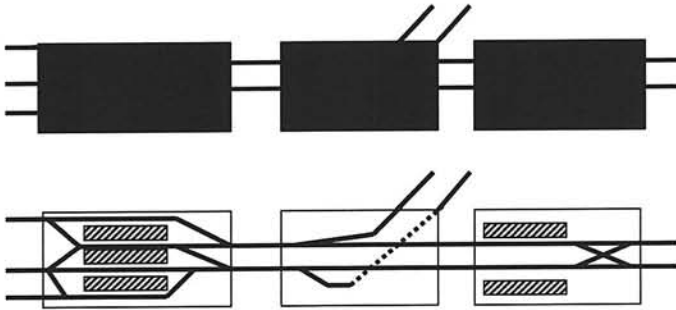
Op het tweede niveau opereert de lokale verkeersregelaar. Hij beheert een lokaal verkeersregelgebied, bestaande uit een aantal verkeersregelpunten⁶ en tussengelegen globale bereikbaarheden, en zorgt daarbinnen voor een goede uitvoering van de treinloop en voor de afhandeling van de optredende conflicten en kleine verstoringen. De lokale verkeersregelaar brengt wijzigingen aan in de planregels en geeft deze door aan het lokale verkeersplan, rekening houdend met de andere lokale verkeersplannen. Het lokale verkeersplan bevat de informatie uit het globale verkeersplan betreffende dat verkeersregelgebied, namelijk aankomst- en vertrektijden in het inwendige van het verkeersregelpunt, aansluitingen, geplande vrije banen, aangevuld met de rijweg van de rit binnen het verkeersregelpunt.

De lokale verkeersregelaar heeft een gedetailleerder beeld van de infrastructuur dan de globale verkeersregelaar. Hij ziet binnen zijn verkeersregelgebied de details van de verkeersregelpunten zoals rijwegen en perrons. Het verschil in overzicht wordt afgebeeld in figuur 1.2. De bovenste situatie in deze figuur is een detail van figuur 1.1 voor een

⁶een verkeersregelgebied kan natuurlijk ook uit slechts één verkeersregelpunt bestaan



Figuur 1.1: Beeld globale verkeersregelaar



Figuur 1.2: Verschil in detailniveau infrastructuur tussen globale (boven) en lokale verkeersregelaar

verkeersregelgebied. De onderste situatie verbeeldt hoe de lokale verkeersregelaar van dat gebied de infrastructuur ziet. In tabel 1.1 worden de bevoegdheden van de lokale en globale verkeersregelaar vergeleken.

Naast de lokale en globale verkeersregelaars is er een logistieke regelaar. Deze beheert globaal het logistieke plan: de voorraden materieel en de materieelbindingen. Onder materieelbindingen worden met name keren, combineren en splitsen verstaan.

1.3.3 Uitvoeringsniveau

Gekoppeld aan het laagste besturingniveau is er een uitvoeringsniveau. Daar communiceert het lokale verkeersplan met de aankomende ritten en controleert deze, aan de hand van zijn planregels, of er conflicten optreden. Het lokale verkeersplan heeft een registrerende en administrerende functie, het registreert de inkomende en vertrekkende ritten en administreert eventuele vertragingen. Verder kent het lokale verkeersplan de opvolgtijden en aansluitingen (uit zijn planregels) en ziet het erop toe dat deze gehaald worden. Het lokale verkeersplan mag geen beslissingen nemen. Als het lokale verkeersplan conflicten registreert moeten deze worden doorgegeven aan de lokale verkeersregelaar.

Tenslotte communiceert het lokale verkeersplan met het globale verkeersplan en het logistieke plan om de planregels consistent te houden.

1.4 Conflict

Zoals gezien dient de lokale verkeersleider een (zo) optimaal (mogelijke) treinenloop te creëren binnen zijn verkeersregelgebied. Dit doet hij, onder meer, door de conflicten die optreden op te lossen. Hiertoe dient eerst te worden gekeken wat deze conflicten zijn.

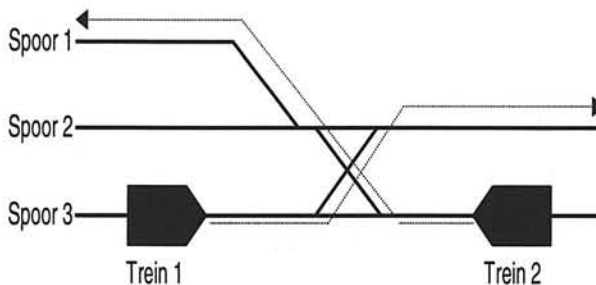
Onderwerp	Globale verkeersregelaar	Lokale verkeersregelaar
aansluitigen	maakt wensen kenbaar	bepaalt wel/niet handhaven
punctualiteiten	maakt wensen kenbaar	bepaalt aankomst/vertrektijden
globale route	legt rit in of heft rit op, bepaalt rij van VRP'en en bereikbaarheden en mag ritten omleiden	accepteert aankomende ritten
lokale route	geen invloed	bepaalt lokale bereikbaarheid

Tabel 1.1: bevoegdheden lokale en globale verkeersregelaar

1.4.1 Soorten

In de literatuur over dispatching en bij de taakorganisaties worden verschillende conflictsoorten onderscheiden⁷:

- **rijwegconflict:** Twee treinen maken op hetzelfde moment aanspraak op een stuk infrastructuur (zie bijvoorbeeld figuur 1.3). Een andere mogelijkheid is dat een trein gebruik wil maken van een stuk infrastructuur dat (tijdelijk) niet beschikbaar is ten gevolge van een ongeval of onderhoudswerkzaamheden.

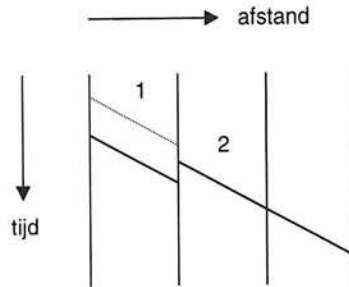


Figuur 1.3: Rijwegconflict

- **stationconflict:** Een te gebruiken perron is bezet of niet lang genoeg voor een bepaalde trein.

⁷deze classificatie wordt ondermeer gevonden in Schaefer & Pferdmenges [31] en Gouweloos [13]

- **aansluitingconflict:** Een vertraagde trein dreigt een aansluiting te missen (zie figuur 1.4). Hierbij moet worden overwogen of de aansluiting behouden blijft, en de aansluitende trein derhalve met vertraging vertrekt, of dat de aansluiting verbroken wordt. Wanneer echter de aansluitende trein gebruik maakt van personeel of materieel van de vertraagde trein zal om verdere vertraging te voorkomen extra personeel of materieel moeten worden ingezet.



Figuur 1.4: Aansluitingconflict

- **dienstregelingconflict:** Er dreigt een aanzienlijke (onacceptabele) vertraging op te treden of de geplande halteringstijd van een trein bij het perron is te kort om de reizigers te laten in en uitstappen.

Bij het oplossen van conflicten dient in sterke mate rekening te worden gehouden met de gevolgen. De oplossing van het (primaire) conflict kan immers secundaire conflicten veroorzaken, die op hun beurt weer tertiaire conflicten als gevolg hebben, enzovoort. Zo kan het dus gebeuren dat een oplossing die de vertraging lijkt te minimaliseren in een bepaald conflict even later kan leiden tot chaos.

1.4.2 Oplossingen

Voor de definitie en oplossing van het probleem is het goed een inventarisatie te maken van de conflicten die kunnen optreden binnen de simulatie en van de mogelijke oplossingen van die conflicten. Dit geeft een goed idee van de omvang en complexiteit van het probleem en van de richting waarin een oplosmethode moet worden gezocht.

De conflicten die kunnen worden onderscheiden, met de respectievelijke te beschouwen oplossingen, zijn⁸:

1. Versperring rijweg
 - Opheffen trein

⁸deze opsomming is grotendeels analoog Gouweloos [14]

- Omleiden trein
 - Gebruiken ander spoor
2. Conflicterende rijwegen
 - Aanscherpen insteltijd (indien deze te laat is)
 - Laten wachten van trein met rijweg met hoogste insteltijd
 - Laten wachten van trein met laagste insteltijd
 - Opdelen samengestelde rijweg in enkelvoudige delen zonder wachten
 - Opdelen samengestelde rijweg in enkelvoudige delen met wachten (één van de treinen wacht op een tussenspoor)
 - Aanpassen van (dwang)route(s) van één of beide treinen
 3. Bezet perronspoor (speciaal geval van vorig punt)
 - Rijweg van aankomende trein ROZ (rijden op zicht) instellen
 - Laten wachten van aankomende trein
 - Wijzigen perronspoor of perronspoorfase aankomende trein
 - Wijzigen perronspoor of perronspoorfase vertrekkende trein (indien mogelijk)
 - Vertrekkende trein eerder laten vertrekken (indien toegestaan)
 4. Trein past niet (volledig) langs perron
 - Wijzigen perronspoor(fase) naar ander perronspoor(fase) met voldoende lengte
 - Wijzigen of toevoegen perronspoorfase (groter deel perron wordt gebruikt)
 - Wijzigen dwangroute
 - Negeren
 5. Verbroken reizigersaansluiting
 - Negeren conflict (aansluiting wordt verbroken)
 - Aansluiting overnemen binnen maximale wachttijd
 - Aansluiting overnemen voorbij maximale wachttijd
 6. Verbroken materieelaansluiting
 - Laten wachten vertrekkende trein
 - Inzetten reservetrein
 7. Verbroken personeelaansluiting
 - Laten wachten vertrekkende trein
 - Inzetten reservepersoneel
 8. Te korte halteringstijd

- Verhogen insteltijd tot de minimum halteringstijd wordt bereikt
 - Negeren
9. Onacceptabele vertraging
- Negeren
 - Opheffen trein
10. Kleine vertraging
- Negeren

Het laatste punt lijkt overbodig, aangezien het vaak de oorzaak is van andere conflicten. Elke vertraging echter is een dienstregelingconflict, waarbij soms echter geen andere conflicten optreden en dus simpel accepteren van de vertraging, en eventueel een aankomst/vertrektijd veranderen, de bijbehorende handeling is.

1.5 Doelstelling

Doelstelling van dit project is invulling geven aan het in BASIS geformuleerde begrip *lokale verkeersregelaar* en de bijbehorende *conflictsignalering*. Het is bij verkeersregeling voor railverkeer een bekend feit dat een verkeersregeling, bestaande uit een aantal op zichzelf goede voorrangregels, toch het gevaar loopt van slechte kwaliteit te zijn. Hetzij omdat beslissingen leiden tot onnodig veel vertraging, hetzij omdat beslissingen leiden tot deadlock situaties, waarin treinen op elkaar staan te wachten totdat er van buitenaf ingegrepen wordt. Elke verkeersregeling moet daarom van tevoren worden getoetst op de kwaliteit van de resulterende beslissingen. De (impliciete) claim dat een voorgestelde verkeersregeling het goed doet moet dus worden geverifieerd.

De vraagstelling van het project is dan ook als volgt:

1. Welke vormen kan een verkeersregeling binnen het kader van BASIS aannemen?
2. Welke voorstellen voor een verkeersregeling binnen BASIS zijn kansrijk?
3. Met welke criteria kan een voorstel voor een verkeersregeling worden beoordeeld?
4. Onder welke omstandigheden zal een verkeersregeling voor railverkeer functioneren?
5. Hoe kan een wiskundige modellering van de verkeersregeling worden gerealiseerd?

Het is bij elk van deze punten de bedoeling een overzicht te geven van de mogelijkheden en een voorstel voor een keuze te doen.

1.6 Beoordelingscriteria

De beoordeling van de wiskundige modellering en het te ontwerpen algoritme (punt drie in de vraagstelling) kan gestoeld worden op een viertal punten, waarbij de nadruk volgens Railned ligt op de eerste twee:

1. Effectiviteit: de oplossingen die in geval van conflicten gegenereerd worden moeten 'voldoende goed' zijn.
2. Efficiency: de toepassing, gebruik in simulatie, moet in het oog gehouden worden, wat inhoudt dat ook snelheid een belangrijke rol speelt.
3. Simpelheid: is het algoritme makkelijk te begrijpen en te implementeren.
4. Flexibiliteit en robuustheid: het algoritme zal makkelijk te veranderen moeten zijn en bruikbaar moeten zijn in verschillende omgevingen.

Bij het eerste punt speelt de vraag wat 'voldoende goed' inhoudt. Railned vindt hiervoor dat er moet zijn voldaan aan één van de volgende punten:

- Optimaliteit wordt bewezen
- Er wordt bewezen dat oplossingen vallen binnen een vastgesteld percentage van het optimum
- Aan experts binnen Railned wordt de werking van algoritme voldoende aannemelijk gemaakt doordat
 - zij geloven in de prestaties van het algoritme.
 - er geen op voorhand eenvoudiger alternatieven naar voren komen.
 - zij vinden dat het algoritme goed presteert op testinstanties.

Aan welk punt uiteindelijk zal moeten worden voldaan hangt nauw samen met de eisen aan de snelheid. Voor het bepalen van de beschikbare tijd voor het bijregelen van het lokale verkeersplan bij conflicten is het gewenst enkele kengetallen van een simulatiesessie bij benadering vast te stellen.

In gesprekken met medewerkers van Railned die zich bezig houden met het project BASIS zijn een aantal eisen naar voren gekomen voor wat betreft de simulatie. Het idee is een simulatie uit te voeren op netwerk-niveau voor het gehele land, voor één dag (dit zijn 20 uren). Het aantal replicaties dat nodig is om een betrouwbaar antwoord te krijgen wordt voorlopig gesteld op 100. De tijd dat zo'n simulatie-sessie mag duren varieert per persoon, van 1.66 uur (scenario 1) tot een nacht (=14 uur) (scenario 2). In het eerste scenario komt één uur in de simulatie overeen met 1200 uur werkelijkheid, in het tweede scenario met 1000/7 uur. Dit zijn de omrekenfactoren.

Het aantal conflicten dat optreedt per replicatie wordt geschat door het aantal conflicten per uur per dienstregelpunt te nemen en dat te vermenigvuldigen met het aantal dienstregelpunten dat van belang is. Hierbij wordt gedacht aan 15 conflicten per uur en 50 dienstregelpunten.

Stel dat voor het oplossen van conflicten een oplosmechanisme moet worden gestart, dat gemiddeld 2 conflicten oplost per sessie. Het oplossen wordt parallel aan de simulatie uitgerekend op een aparte processor, die zich alleen daarmee bezig houdt. Dit geeft per uur simulatie 3600 seconden beschikbaar voor conflictoplossing.

De beschikbare tijd per oplossessie volgt nu uit:

$$\text{processortijd} / \left(\frac{\text{aantal conflicten per uur} \times \text{omrekenfactor}}{\text{aantal conflicten per sessie}} \right)$$

Scenario 1 geeft nu een beschikbare tijd per oplossessie van: 0.008 seconde, terwijl scenario 2 0.067 seconde geeft. Grofweg kan dit worden gezien als een beschikbare tijd tussen de 10^{-1} en 10^{-2} seconden.

De snelheid zoals boven aangegeven lijkt onhaalbaar, al moet er natuurlijk bijgezegd worden dat snelheid in tijd uitgedrukt relatief is, aangezien een snellere computer tot betere resultaten leidt. Deze cijfers laten echter zien dat de snelheid van een bijregelingsprocedure van zeer groot belang is, en dat hieruit volgend het vinden van een toegelaten 'goede' oplossing prioriteit krijgt boven het vinden van de optimale oplossing.

1.7 Leeswijzer

In de vorige paragraaf is reeds het derde punt van de doelstelling behandeld, waar is aangegeven hoe de gepresenteerde technieken en modellering kunnen worden beoordeeld.

De eerste twee punten van de doelstelling zijn het onderwerp van hoofdstuk 2. Daarin zal een overzicht worden gegeven van bestaande literatuur en technieken op de aan verkeersregeling verwante gebieden, zoals dienstregelingsgeneratie, dispatching en routing op stations. Verder zal in dat hoofdstuk een classificatie gegeven worden waar de bestaande en toekomstige literatuur en technieken in kunnen worden ondergebracht.

De laatste twee punten van de doelstelling worden teruggevonden in de hoofdstukken vanaf hoofdstuk 3. In hoofdstuk 3 zal een modellering worden gepresenteerd, samen met de gemaakte keuzes om tot die modellering te komen. In de drie hoofdstukken die daarop volgen wordt aan deze modellering verder invulling gegeven. Aangezien het een deel van de doelstelling van dit project is, zal ook hier, naast het doen van een voorstel voor de modellering van de verkeersregeling, aandacht worden besteed aan het opsommen en (beknopt) uitleggen van mogelijke modelleringen en technieken.

In hoofdstuk 7 worden resultaten van de implementatie van de gekozen modellering en technieken gepresenteerd, waarna de conclusies en aanbevelingen volgen in hoofdstuk 8.

Hoofdstuk 2

Literatuur en Probleemclassificatie

In het vorige hoofdstuk is de doelstelling van het project uiteengezet. Punt vier en vijf hierin waren de vragen welke vormen een verkeersregeling binnen het kader van Basis kan aannemen en welke voorstellen voor een verkeersregeling kansrijk zijn. Om een antwoord op deze vragen te kunnen geven wordt eerst een overzicht gegeven van literatuur over onderwerpen die dicht bij verkeersregeling liggen, zoals dienstregelinggeneratie en dispatching, zoals de conflictoplossing in de Engelstalige literatuur wordt genoemd.

Vervolgens wordt geprobeerd een grove classificatie te maken van methodes voor conflictoplossing, waarbinnen de bestaande literatuur geplaatst kan worden. Hiervoor wordt een inventarisatie gemaakt van de punten waarop, bij het maken van een methode voor de conflictoplossing, keuzes moeten worden gemaakt, afgezien van de daadwerkelijke algoritmie.

Tenslotte zal een keuze voor een van de klassen de basis leggen voor de uiteindelijke oplossing van het probleem van verkeersregeling binnen simulatie.

2.1 Literatuurverkenning

Er is al veel onderzoek gedaan naar onderwerpen die dicht liggen bij het onderwerp van dit project. Om een idee te krijgen wat deze onderzoeken inhouden zullen in deze sectie beknopt de resultaten worden weergegeven. Eerst wordt een overzicht gegeven van bekende literatuur op het gebied van beslissingsondersteunende systemen voor verkeersleiding. Vervolgens wordt gekeken naar een door het CWI uitgevoerde studie naar het genereren van optimale control-regels voor het treinverkeer. Tenslotte worden twee projecten, *DONS* en *Stations* besproken die het genereren van dienstregelingen en de routing van treinen door stations bestuderen. De laatste drie projecten zijn uitgevoerd in opdracht van Railed en zijn erg wiskundig van aard. De modellering zal slechts zeer beknopt worden weergegeven, om een indruk te geven van de aanpak.

2.1.1 Beslissingsondersteunende systemen

In de literatuur is veel onderzoek gedaan naar beslissingsondersteunende computersystemen voor de verkeersleiding. In de Verenigde Staten is het onderzoek¹ meestal gericht op het optimale gebruik van het (voornamelijk) enkelsporig stelsel. Bij de spoorwegmaatschappijen in onze regio hebben we echter te maken met een dicht bereden personenvervoersnet.

In een project van de NS door Gouweloos [13] en [14] wordt onderscheid gemaakt tussen twee aanpakken voor beslissingsondersteunende systemen, namelijk:

- een aanpak met behulp van kennistechnologie, waarbij tot een beschrijving wordt geprobeerd te komen van de kennis die aanwezig is en de wijze waarop deze gebruikt wordt. Door formalisering van de oplossingsstrategieën en de kennis van de verkeersleider, wordt een systeem gebouwd dat het werk kan nadoen en oplossingen voor planningsproblemen kan maken.
- een aanpak in de operations research sfeer, waarbij een volgens opgegeven criteria optimaal plan wordt gezocht, gegeven een verzameling beperkingen. Hierbij kan eventueel rekening gehouden worden met onzekerheid die optreedt.

In het genoemde onderzoek wordt gekozen voor de operations research oplossing. Het ontworpen systeem presenteert de beste oplossing(en) aan de procesleider (verkeersleider) die ze accepteert of verwierpt en, door te sleutelen aan de randvoorwaarden, het systeem in de richting stuurt van een door hem gewenste oplossing. In de voorwaarden van zo'n systeem wordt vermeld dat het niet noodzakelijkerwijs met 'de beste' oplossing dient te komen maar wel met een redelijke oplossing. Zou immers het systeem met 'domme' oplossingen komen, dan wordt het hele systeem snel genegeerd. Het vinden van de oplossingen is gebaseerd op het doorlopen van een zoekboom.

Een voorbeeld van een beslissingsondersteunend systeem gebaseerd op kennistechnologie wordt gevonden in Schaefer & Pferdmenges [31]. Hierin wordt een expertsysteem beschreven, ontwikkeld door de Siemens Transportation Systems Group. Hierbij wordt expertkennis gebruikt voor negatieve en positieve selectie van mogelijke oplossingen door o.a.:

- inschatten welke beslissing waarschijnlijk secundaire conflicten zal voorkomen en dus tot de beste resultaten leidt.
- inschatten welke beslissing waarschijnlijk leidt tot het schenden van 'zachte' constraints zoals het missen van aansluitingen.
- voorkomen van beslissingen die logischerwijs niet mogen voorkomen, zoals het volgen van een stoptrein door een sneltrein terwijl inhalen mogelijk is.

¹zie bijvoorbeeld Jovanovic & Harker [17]

Bij deze methode wordt er gezocht naar een beperkte verzameling lokale optima in de geselecteerde oplossingsruimte, door een goed gekozen kostenfunctie te gebruiken. De beste oplossing wordt bepaald door drie opeenvolgende stappen:

1. alle oplossingen voor het primaire conflict worden doorgerekend en gecontroleerd op het niet schenden van 'harde' constraints, zoals het vrij zijn van sporen, voldoende lengte van perrons, het niet optreden van deadlock-situaties.
2. één of meer gecontroleerde oplossingen worden via bepaalde regels uitgekozen en getoond aan de verkeersleider. Deze regels representeren strategieën voor het selecteren van de beste oplossing, rekening houdend met 'zachte' constraints en eventueel optredende secundaire (en verder) conflicten, zonder alle gevolgen door de rekenen.
3. de gekozen oplossing wordt afgebeeld in een tijd-weg diagram en gezonden naar het controlesysteem.

De regels, die ontstaan zijn uit de expertkennis zoals boven is vermeld, kunnen worden gegroepeerd in verschillende strategieën zoals:

- het halen van aansluitingen.
- intercity's gaan voor sneltreinen, die weer voor stoptreinen gaan.
- wie het eerst komt die het eerst maalt.

De korte berekeningstijden maken dit systeem erg geschikt voor real-time applicaties.

In een onderzoek van Pachl [25] wordt alle aandacht gegeven aan het voorkomen van deadlock-situaties. Onder deadlock-situaties worden hier situaties bedoeld waarbij een aantal treinen niet meer vooruit kan zonder dat er eerst minstens één trein achteruit rijdt. In dit artikel wordt gesteld dat een dienstregeling goed deadlockvrij kan worden opgesteld, maar dat op het moment dat er een verstoring optreedt het gevaar voor deadlock bijzonder groot is.

Bij het vinden van een oplossing van de verstoring, dat wil zeggen, elke ingreep die af doet wijken van de dienstregeling, en zeker bij het ontwerpen van een voorrangregeling, dient scherp gelet te worden op het ontstaan van deadlocksituaties. Dit wordt bereikt door een eventgraafrepresentatie te maken die de gevolgen van eventuele beslissingen weergeeft. Een cycle in deze graaf wijst op een deadlocksituatie. De eventgraaf zal dus een eventboom moeten zijn.

2.1.2 Control-regels

Het gaat hier niet, zoals in het voorgaande, om een beslissingsondersteunend systeem voor de verkeersleiding, maar om een optimale control-regel voor de volgorde waarin treinen een vrijebaanspoor betreden. Wanneer een trein die bij een bepaald station dient te vertrekken vertraagd is, kan dit invloed hebben op andere vertrekkende treinen. Verkeersleiders

kunnen in dit soort situaties besluiten de volgorde van twee of meer treinen te verwisselen om kosten en/of vertraging te minimaliseren.

CWI-methode

De eerste aanpak van deze soort, is de aanpak die wordt voorgesteld door het CWI (Centrum voor Wiskunde en Informatica) in Overkamp, van Schuppen & de Waal [24]. Eerst wordt er een modellering gemaakt van het railverkeer, in de vorm van een gerichte graaf, waar de knopen stations (en eventueel andere infra-knooppunten, zoals splitsingen en plaatsen waar treinen elkaar kunnen inhalen) en de kanten baanvakken tussen twee knopen voorstellen.

De dienstregeling wordt alleen beschreven in de vorm van vertrek- en aankomsttijden bij knopen, waarbij wordt uitgelegd hoe de vertrek en aankomsttijden van de verschillende treinen samenhangen. Vanuit deze modellering wordt een dynamisch programmeringsaanpak gevolgd, waar de optimale control-regel uit volgt. In de situatie van drie stations, i_1 , i_2 en i_3 , en twee treinen, k_1 en k_2 , wordt doelfunctie gekarakteriseerd als:

$$J(g) = \sum_{k_1, k_2} \sum_{i=1}^3 w_i(k) r(i, k), \quad (2.1)$$

waar $g \in G$ een control-regel uit de verzameling mogelijke regels G is, $w_i(k)$ gewichten zijn en $r(i, k)$ een hier verder niet gespecificeerde kostenfunctie is, die afhangt van de afwijking tussen de geplande en de gerealiseerde aankomsttijden. De control-regel g moet nu zo gekozen worden dat de totale kosten $J(g)$ in (2.1) geminimaliseerd worden.

Als bij het tweede station de aankomsttijden bekend zijn, zeg T_{i_2, k_1} en T_{i_2, k_2} respectievelijk de aankomsttijd van trein k_1 bij station i_2 en trein k_2 bij station i_2 , dan kan de optimale beslissing als volgt worden beschreven:

$$g_{i_2}^*(T_{i_2, k_1}, T_{i_2, k_2}) = \begin{cases} (k_1, k_2), & \text{als } J_3(k_1, T_{i_2, k_1}, T_{i_2, k_2}) \leq J_3(k_2, T_{i_2, k_1}, T_{i_2, k_2}), \\ (k_2, k_1), & \text{als } J_3(k_1, T_{i_2, k_1}, T_{i_2, k_2}) > J_3(k_2, T_{i_2, k_1}, T_{i_2, k_2}) \end{cases}$$

Bekend is nu dus wat optimaal is op de laatste kant. Nu moet ditzelfde worden bepaald voor de eerste kant. Laat de aankomsttijden van trein k_1 en trein k_2 bij station i_1 weer bekend zijn, T_{i_1, k_1} en T_{i_1, k_2} . Noem vervolgens $C(k_i)$ de kosten van afwijking van de geplande tijdstippen wanneer trein k_i voorgaat, $T_{i_2, k_1}(k_i)$ de aankomsttijd voor trein k_1 bij station i_2 als trein k_i voorgaat bij station i_1 en $J_3^*(T_{i_2, k_1}(k_i), T_{i_2, k_2}(k_i))$ de totale kosten voor de tweede kant, resulterend uit de optimale beslissing, gegeven de aankomsttijden bij station i_2 . Dan geldt voor de optimale beslissing op station i_1 :

$$g_{i_1}^*(T_{i_1, k_1}, T_{i_1, k_2}) = \begin{cases} (k_1, k_2), & \text{als } \begin{aligned} & C(k_1) + J_3^*(T_{i_2, k_1}(k_1), T_{i_2, k_2}(k_1)) \\ & \leq C(k_2) + J_3^*(T_{i_2, k_1}(k_2), T_{i_2, k_2}(k_2)), \end{aligned} \\ (k_2, k_1), & \text{als } \begin{aligned} & C(k_1) + J_3^*(T_{i_2, k_1}(k_1), T_{i_2, k_2}(k_1)) \\ & > C(k_2) + J_3^*(T_{i_2, k_1}(k_2), T_{i_2, k_2}(k_2)) \end{aligned} \end{cases}$$

Het spreekt voor zich dat bij een groter netwerk dit zeer veel rekenwerk oplevert.

Voor de situatie van twee knopen en één verbinding daartussen is een drempelwaarde te berekenen, waarbij trein k_1 voor trein k_2 rijdt als de aankomsttijd van trein k_1 kleiner is dan deze drempelwaarde (afhankelijk van de aankomsttijd van k_2) en na trein k_2 als de aankomsttijd van trein k_1 groter is dan die drempelwaarde.

Verder wordt aangegeven dat door decompositie elk netwerk kan worden teruggebracht tot een aantal systemen van een enkele kant, die ieder afzonderlijk kunnen worden geanalyseerd. Toepassing hiervan vraagt echter om nadere studie, waarbij moet worden gekeken of de optimale deelbeslissingen ook leiden tot een goede oplossing voor het hele netwerk en of er sprake kan zijn van deadlock-situaties. Ook de ideeën die worden gegeven voor de modellering van kruisingen en stochastische tijdstippen moeten nog nader bestudeerd worden.

Stochastische vertragingen

In het artikel van Carey en Kwiecinski [5] wordt gekeken naar de volgorde van twee vertrekkende treinen op een willekeurig station A , met als bestemming station B . Stel dat trein 1, oorspronkelijk geplande vertrektijd tijdstip T , vertraging heeft, waarvan de precieze waarde onbekend is, maar waarvoor wel een kansverdeling bekend is. Trein 2 is klaar voor vertrek op zijn geplande vertrektijd $T + H$. Neem nu voor het gemak aan dat $T = 0$ geldt, dus alle tijden worden relatief tot het geplande vertrektijd van trein 1 uitgedrukt. Definieer de swaptijd s als de hoeveelheid tijd zo dat als de vertraging van trein 1 groter is dan s , de treinen van volgorde wisselen, dat wil zeggen, trein 2 vertrekt voor trein 1. Dit leidt tot de volgende strategie:

- Als trein 1 klaar is voor vertrek voor een van te voren bepaald tijdstip s , laat hem dan onmiddellijk en als eerste vertrekken. Als geldt dat $s > H$ betekent dit dat trein 2 (ook) vertraagd wordt.
- Als trein 1 op tijdstip s nog niet klaar is voor vertrek wordt de volgorde omgedraaid en vertrekt trein 2 als eerste. Als geldt dat $s < H$ dan zal trein 2, en dus trein 1, wel moeten wachten tot tijdstip H alvorens te mogen vertrekken.

De swaptijd s kan elke waarde tussen 0 en ∞ aannemen en de optimale waarde hangt af van de kansverdeling van de vertraging van trein 1 en de respectievelijke kosten van vertraging van trein 1 en 2. De vertraging van de eerste trein wordt genoteerd door de stochastische variabele L en de realisatie ervan door $L = l$. L wordt gegeven door de kansdichtheid $f(l)$. De vertraging van trein i bij station B , gegeven de vertraging van trein 1 $L = l$ bij station A en de swaptijd s , is $d_i(l, s)$. De verwachte kosten, behorende bij een bepaalde swaptijd s is:

$$C(s) = Er_1(d_1(L, s)) + Er_2(d_2(L, s)), \quad (2.2)$$

waarbij $r_i(L, s)$ de kostenfunctie voor een vertraagde aankomst van trein i bij station B is. Door de verwachte-kostenfunctie te minimaliseren kan een optimale s bepaald worden.

Resultaten van het onderzoek zijn:

- Als de eerste trein langzamer is dan de tweede, de kostenfuncties $r_i(\cdot)$ niet-dalend, $r_2(0) = 0$ en $f(\cdot) > 0$ in een bepaald interval is dan heeft verwachte-kostenfunctie $C(s)$ in (2.2) een uniek minimum.
- Onder de voorwaarden van het vorige punt hangt de optimale s niet af van $f(\cdot)$.
- Als de eerste trein sneller is dan de tweede en de kostenfuncties $r_i(\cdot)$ lineair in d , dan zal meestal de optimale strategie zijn: draai de volgorde om direct als trein 2 gereed is of draai de volgorde helemaal niet om.
- Meer informatie over de vertraagdheid kan worden opgenomen in $f(\cdot)$.

In deze methode wordt echter geen rekening met veiligheid-opvolgtijden tussen treinen.

2.1.3 MARCO

Een zeer recent onderzoek naar conflictdetectering en -oplossing is MARCO: Multilevel Advanced Railways Conflict resolution and Operational control. Dit project vindt zijn oorsprong in de samenwerking van verschillende Europese spoorwegmaatschappijen, waaronder die in Finland, België en Italië, en onderzoekcentra, waaronder de universiteiten van Joensuu (Finland), Hannover (Duitsland), Genoa (Italië) en King's college Londen (Verenigd Koninkrijk). Het doel van het project is het ontwikkelen van hulpmiddelen voor conflictdetectering en -oplossing die gebruikt kunnen worden ter ondersteuning van de verkeersleiding.

Conflictdetectering

Eén van de hulpmiddelen is een simulator die het treinverkeer simuleert, bijvoorbeeld tot twee uur in de toekomst, gebaseerd op het huidige verkeersplan, de huidige infrastructuur en treinstatus. Aan de hand van deze simulatie worden toekomstige conflicten geregistreerd. In de toepassing wordt echter een tijdshorizon van 8 uur gebruikt. Het is in de documenten niet echt duidelijk aangegeven, maar waarschijnlijk wordt er deterministisch gesimuleerd. Onzekerheid wordt nergens meegenomen.

Optimalisatie

De conflicten die door de simulator worden opgemerkt dienen opgelost te worden door de 'optimalisator'. Het doel van de optimalisator is het snel vinden van conflictvrije verkeersplannen met weinig vertraging en een hoge servicegraad. In een rapport van Boyce en Jose [4] wordt beschreven hoe gezocht is naar geschikte algoritmen voor dit probleem.

De modellering gaat via het Constraint Satisfaction Problem (CSP). Een CSP bestaat uit een eindige verzameling van variabelen, een eindig domein behorende bij elk van die variabelen en een verzameling beperkingen. In wiskundige notatie is dat als volgt:

- Z = eindige verzameling variabelen $\{x_1, \dots, x_n\}$.
 D = functie die aan iedere $x_i \in Z$ een waarde toekent.
 $D : Z \rightarrow$ verzameling waarden. D_{x_i} is nu domein van x_i .
 C = eindige verzameling beperkingen op een willekeurige deelverzameling van Z .

Een oplossing S voor dit probleem is nu een toekenning van waarden aan $\{x_1, \dots, x_n\}$ zodanig dat geen van de beperkingen overtreden wordt. Door het toevoegen van een functie $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ wordt het probleem een Constraint Satisfaction Optimization Problem (CSOP), waarbij van alle oplossingen die oplossing wordt gezocht die de hoogste of laagste waarde van $f(S)$ heeft.

Een variabele representeert nu een trein-station paar, waarbij de domeinwaarden (kno- pen) de vertragingen zijn die op dat station aan die trein wordt toegewezen. De beperkingen zijn bijvoorbeeld de eis dat de vertragingen niet negatief zijn, dat een vertrek na een aankomst plaatsvindt, dat de stations niet meer treinen kunnen herbergen dan hun maximale capaciteit en dat opvolgtijden niet geschonden worden.

De oplosmechanisme waaraan wordt gedacht is de GENET-architectuur, een soort neu- raal netwerk. De knopen, zoals hierboven besproken, vormen het netwerk, waarbij de waar- den van de verbindingen tussen de knopen worden bepaald door de beperkingen. Aan niet toegestane verbindingen wordt initieel de waarde -1 toegekend, aan de andere de waarde 0. Deze waarden zullen veranderen als het netwerk een leermechanisme ondergaat. Voor de precieze leermechanisme en kostendefinitie wordt verwezen naar het bovengenoemde rapport.

In het rapport wordt opgemerkt dat de GENET methode een goede oplossing geeft, maar dat deze te langzaam is voor real-time gebruik. Een snellere aanpak wordt hier 'in- telligent search' genoemd. Hierbij wordt de handelswijze van de verkeersleider nagebootst, door voor elk conflict één van de betreffende treinen te vertragen, onder meer afhankelijk van het gewicht van de trein en het aantal stations dat deze nog moet bezoeken.

Het testprobleem dat wordt gebruikt is een deel van het Finse railnetwerk (13 stations, waarvan de meeste 2 of 3 sporen hebben en 136 treinen), een stuk enkelsporig en een stuk dubbelsporig. Er wordt een tijdsvenster gebruikt van 485 minuten en er zijn 537 trein-station knopen. Een aantal scenario's is doorgerekend, die onderling verschillen in het aantal primaire conflicten (tussen 3 en 22). De zoektijd van GENET varieert hierbij tussen de 3 en 5 minuten, terwijl 'intelligent search' tussen de 1 en 2 seconde bezig is.

2.1.4 DONS

Eind 1992 is het project DONS² (Designer Of Network Schedules) gestart, gericht op de ontwikkeling van een beslissingsondersteunend systeem voor een snelle automatische constructie van dienstregelingen. Het ontwerpen van een dienstregeling komt neer op het oplossen van constraints die de structuur van de dienstregeling vastlegt. Alle constraints

²voor meer details over DONS, of de achterliggende solver CADANS, zie Odijk [23], van den Berg & Odijk [1] of Schrijver & Steenbeek [32]

voor een dienstregeling kunnen worden beschreven in de vorm

$$\tau_j = (\tau_i + x) \bmod T, \text{ with } x \in [l_{ij}, u_{ij}], \quad (2.3)$$

waar T , l_{ij} en u_{ij} geheeltallig, met $0 < u_{ij} - l_{ij} < T$, en $a = b \bmod T$ betekent dat $a - b$ een veelvoud van T is. Verder zijn τ_i en τ_j de tijdstippen van de i -de en j -de event, bijvoorbeeld het vertrek van een bepaalde trein bij een bepaald station.

De constraints van (2.3) zijn representaties van verschillende praktische eisen waar de dienstregeling aan moet voldoen. Voorbeelden zijn:

- aansluitingseisen; passagiers moeten kunnen overstappen of treinen moeten gekoppeld worden.
- infrastructuureisen; twee treinen kunnen niet op hetzelfde moment gebruik maken van hetzelfde stuk infrastructuur, maar daar moet tenminste bijvoorbeeld twee minuten tussen zitten.
- frequentie-eisen; een trein moet bijvoorbeeld elk half uur of elk kwartier rijden.

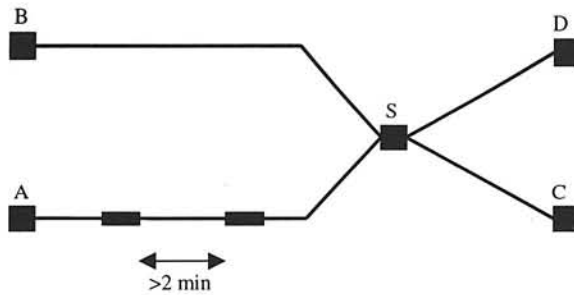
De constraints die zo geconstrueerd worden, kunnen worden gevisualiseerd door een gerichte graaf (G), waar de events de knopen zijn en de constraints de kanten. Het stelsel vergelijkingen wordt vervolgens herschreven in vectornotatie:

$$l \leq B^T \tau + pT \leq u, \quad (2.4)$$

waar B de knoop-kant incidentie matrix van G is, τ de vector die de dienstregeling voorstelt en p een geheeltallige vector. Het probleem richt zich nu op het vinden op de vectoren τ en p . Voor een vaste p kan (2.4) worden omgeschreven tot

$$l_p \leq B^T \tau \leq u_p,$$

met $l_p = l - pT$ en $u_p = u - pT$ en noem p een toegelaten p -vector als dit systeem toelaatbaar is. Gegeven p kan voor de dienstregeling een zekere marge bepaald worden waarbinnen deze uitvoerbaar blijft.



Figuur 2.1: Situatie in voorbeeld 1

Voorbeeld 1 Een voorbeeld wordt gevonden in Weits [36]. Stel dat we drie treinseries hebben, genummerd één tot en met drie. Een treinserie bestaat uit treinen die elke periode een trein rijdt op hetzelfde tijdstip. Trein één rijdt van A naar C via S, trein 2 van B naar D via S en trein 3 is een sneltrein van A naar C die rijdt via S maar daar niet stopt (zie figuur 2.1). Tussen de treinen 1 en 2 moet een overstap mogelijk zijn in beide richtingen, waarbij de stoptijd op S tussen de 2 en 4 minuten moet liggen. Verder geldt de veiligheidseis dat treinen minimaal twee minuten afstand moeten hebben. De events worden genoteerd als τ_{1Ca} en τ_{1Cd} . Deze representeren dan respectievelijk de aankomst en vertrek van trein 1 bij station C. De constraints die gegenereerd kunnen worden zijn:

$\tau_{1Sa} - \tau_{1Ad} \bmod T = 30$	rijtijd
$\tau_{1Ca} - \tau_{1Sd} \bmod T = 20$	rijtijd
$\tau_{2Sa} - \tau_{2Bd} \bmod T = 20$	rijtijd
$\tau_{2Da} - \tau_{2Sd} \bmod T = 20$	rijtijd
$\tau_{3Sa} - \tau_{3Ad} \bmod T = 24$	rijtijd
$\tau_{3Ca} - \tau_{3Sd} \bmod T = 15$	rijtijd
$2 \leq \tau_{1Sd} - \tau_{1Sa} \bmod T \leq 4$	stoptijd
$2 \leq \tau_{2Sd} - \tau_{2Sa} \bmod T \leq 4$	stoptijd
$\tau_{3Sd} - \tau_{3Sa} \bmod T = 0$	stoptijd
$2 \leq \tau_{1Sd} - \tau_{2Sa} \bmod T \leq 5$	overstap 2 naar 1
$2 \leq \tau_{2Sd} - \tau_{1Sa} \bmod T \leq 5$	overstap 1 naar 2
$8 \leq \tau_{3Ad} - \tau_{1Ad} \bmod T \leq 58$	veilige tussentijd ivm infrastructuur
$7 \leq \tau_{3Sd} - \tau_{1Sd} \bmod T \leq 58$	veilige tussentijd ivm infrastructuur

Hierbij valt op dat de constraints gegeven door de infrastructuur niet symmetrisch zijn. Dit is de modellering van het feit dat de sneltrein sneller gaat dan de stoptrein. Wanneer de sneltrein als eerste vertrekt zal een tussentijd van twee minuten volstaan, als de stoptrein voorgaat zal de sneltrein met wat meer achterstand vertrekken om niet door de stoptrein gehinderd te worden, als er tenminste onderweg niet de mogelijkheid is om in te halen.

2.1.5 Routing op stations

In de afgelopen jaren is een model, genaamd *Stations*, ontwikkeld voor de routing van treinen door een station, gegeven een dienstregeling. Hierin wordt, binnen een toegelaten oplossing van DONS, geschoven met vertrek en aankomsttijden, zodat toewijzingen van treinen aan routes en perrons worden gevonden. Voor een uitgebreide beschrijving van het model zie Zwaneveld [37]. Beknopt komt het model neer op het volgende.

Beschouw een station waarvan de layout van baanvakken S vastligt. De verzameling treinen die gerouteerd moet worden heet T , waarbij elke trein t vanuit *DONS* een geplande aankomst a_t en vertrektijd d_t heeft meegekregen. Een afwijking is een combinatie van een afwijking van de aankomsttijd en een afwijking van de vertrektijd, genoteerd door $\delta = (\delta^a, \delta^d)$. De verzameling toegestane afwijkingen van de aankomsttijd wordt genoteerd door Δ_t^a en van de vertrektijd door Δ_t^d . De verzameling van alle combinaties van toegestane afwijkingen is Δ_t .

Van elke trein is bekend van welk punt hij het station binnenkomt en/of vertrekt. De inrij-, uitrij- en platformroutes voor trein t moeten komen uit de verzamelingen R_t^i , R_t^o en R_t^p respectievelijk, waarbij R_t de vereniging van deze drie verzamelingen is.

Voor elke trein wordt een verzameling $F_t^i \subset R_t^i \times \Delta_t^a$ van toegelaten inrij combinaties (r, δ^a) , een verzameling $F_t^o \subset R_t^o \times \Delta_t^d$ van toegelaten uitrij combinaties (r, δ^d) en een verzameling $F_t^p \subset R_t^p \times \Delta_t$ van toegelaten platform combinaties (r, δ) . Een element van deze verzamelingen staat voor het gebruik van een bepaalde route op een bepaald tijdstip. De verzameling F is de vereniging van deze drie verzamelingen.

Om veiligheidsredenen kunnen bepaalde paren routingeringen niet gelijktijdig plaatsvinden. Introduceer daartoe de verzameling $F_{t,t'}$ van paren wel toegestane combinaties van routingeringen (f, f') voor elk paar treinen $t, t' \in T$. Zo geldt bijvoorbeeld dat $(f, f') = ((r, \delta^a), (r', \delta^d)) \in F_{t,t'}$ betekent dat de routingering van trein t via inrijroute r met aankomstafwijking δ^a gelijktijdig kan met de routingering van trein t' op platformroute r' met als afwijking δ^d . Zie Zwaneveld [37] voor de precieze bepaling van deze paren. De gedefiniëerde variabelen zijn nog eens samengevat in tabel 2.1.

Hiermee kan een wiskundig model worden gespecificeerd van de volgende vorm:

$$\max \sum_{t \in T} \sum_{f \in F_t^i} \rho_{t,f} X_{t,f} \sum_{t \in T} \sum_{f \in F_t^o} \rho_{t,f} X_{t,f} \sum_{t \in T} \sum_{f \in F_t^p} \rho_{t,f} X_{t,f} \quad (2.5)$$

onder de voorwaarden:

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{f \in F_t^i} X_{t,f} \leq 1 \quad \forall t \in T \\ \sum_{f \in F_t^o} X_{t,f} \leq 1 \quad \forall t \in T \\ \sum_{f \in F_t^p} X_{t,f} \leq 1 \quad \forall t \in T \\ X_{t,f} + X_{t',f'} \leq 1 \quad \forall t, t' \in T; f \in F_t; f' \in F_{t'}; (f, f') \notin F_{t,t'} \\ X_{t,f} \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T; f \in F_t \end{array} \right\} \quad (2.6)$$

Het probleem (2.5) en (2.6) kan worden gezien als een weighted node packing problem en

S	de verzameling baanvakken.
T	de verzameling treinen die gerouteerd moeten worden.
R	de verzameling routes door het station, wat verder kan worden opgesplitst in R_t^i , R_t^o en R_t^p , als zijnde de inrijd, uitrijd en perronroutes van trein t .
a_t	de geplande aankomsttijd van trein t .
d_t	de geplande vertrektijd van trein t .
δ	een paar afwijkingen (δ^a, δ^d) van de geplande aankomst en vertrek tijd.
Δ_t	de verzameling afwijkingen toegestaan voor trein t , resulterend uit DONS.
P	verzameling baanvakken behorend bij een perron of passeer-baanvak.
F	verzameling alle mogelijke routeringen; een routing f bestaat uit een toegelaten combinatie van een route r en een afwijking δ . F wordt weer onderverdeeld in F_t^i , F_t^o en F_t^p .
$F_{t,t'}$	verzameling paren toegelaten routeringen voor trein t en t' .
$\rho_{t,f}$	de voorkeur van trein t voor route f .
$X_{t,f}$	beslissingsvariabele die de waarde één heeft als trein $t \in T$ route $f \in F_t$ berijdt en nul anders.

Tabel 2.1: Notatie in Stations

in Zwaneveld [37] wordt de oplossingsstrategie gegeven.

2.2 Classificatie

Het is een deel van de doelstelling de bestaande literatuur en toekomstige onderzoeken te classificeren. Hiertoe zal eerst een inventarisatie worden gemaakt van modelleringskeuzes die ten grondslag liggen aan de modellen. Vervolgens wordt een voorstel voor classificatie gedaan.

2.2.1 Modelleringsmogelijkheden

Bij de modellering van het probleem moet een groot aantal keuzes gemaakt worden. De punten waarbij keuzes mogelijk zijn bij de modellering van het probleem met hun mogelijkheden zijn:

- **tijd:** Hebben aankomsten en vertrekken vaste tijdstippen of krijgen ze een tijdsvenster waarbinnen ze verwacht worden op te treden? Dit hangt nauw samen met het modelleren van de onzekerheid binnen het systeem. Verder kan onderscheid worden gemaakt tussen een continue tijd of discrete tijd. Bij discrete tijd kunnen de events of tijdsvensters slechts op een beperkt aantal momenten beginnen (bijvoorbeeld de hele minuten). Dit beperkt de zoekruimte.
- **planhorizon:** Wordt er gebruik gemaakt van een vast venster (kwartier, uur) of is de planhorizon zo groot als er meldingen binnen zijn? Dit probleem hangt af van de

keuze voor de opbouw van het verkeersplan. Door de vorm van het oorspronkelijke (globale) verkeersplan, bestaande uit een basis-uur-patroon lijkt, bij het kiezen voor een vaste planhorizon, een planhorizon van één uur voor de hand te liggen, waarbij verwacht kan worden dat binnen het basis-uur-patroon voldoende ruimte ligt voor het in het geheel opvangen van de verstoringen. Hierbij moet echter gelet worden op de volgende punten:

- een (te) lange planhorizon is niet zinvol omdat gebeurtenissen die plaatsvinden na een bepaald tijdstip (bijvoorbeeld een kwartier) erg onzeker zijn. Het is zeer de vraag of voorspelde conflicten na dat tijdstip ook daadwerkelijk plaatsvinden. Er kan hierbij worden gedacht aan het toekennen van kansen aan toekomstige conflicten. Bij een kans lager dan een bepaalde drempel wordt het conflict verwaarloosd.
 - een (te) korte planhorizon kan leiden tot een situatie waarbij zoveel mogelijk problemen uitgesteld worden.
- **lokaal verkeersplan:** Voor de opbouw van het lokale verkeersplan kunnen twee basis-ideeën onderscheiden worden. Ten eerste kan gedacht worden aan een verkeersplan waarbij steeds de ritten, die zichzelf aanmelden, worden toegevoegd aan het bestaande verkeersplan. De tijdsduur die dit verkeersplan beslaat heeft geen vaste grootte, wat we in het vervolg een variabele planhorizon zullen noemen. Ten tweede kan gedacht worden aan een verkeersplan met een vaste planhorizon, waarbij de informatie wordt gehaald uit het globale verkeersplan om telkens de planhorizon te vullen. Bij het aanmelden van de ritten wordt gecontroleerd of de voorspelde aankomsttijd overeenkomt met het bestaande plan en wordt het lokale verkeersplan aangepast indien nodig, door het verkeersregelpunt. Als er conflicten worden deze door de lokale verkeersregelaar opgelost.
 - **detailroute:** Bij het herplannen kan voor elke rit gekozen worden voor een vaste route, een (beperkte) verzameling routes of alle mogelijkheden. Het laatste lijkt te complex om (vaak) te moeten berekenen. Ook dient te worden bekeken of het halte-ringsperron als vast wordt beschouwd of dat daarvoor ook een (beperkte) verzameling van mogelijkheden aanwezig is.
 - **communicatie:** Alleen optimalisering eigen gebied of rekening houden met burens via vaste regels of via de globale verkeersregelaar (zie subsectie 3.1).
 - **doelfunctie:** Worden afwijkingen (en conflicten) in de (verre) toekomst (zowel in eigen verkeersregelpunt als in ver gelegen verkeersregelpunten) zwaar bestraft om het uitstellen van problemen te voorkomen of juist licht, omdat de onzekerheid in de toekomst toch groot is? Verder is de vraag welke elementen in de boetefunctie voorkomen. Mogelijke elementen in de doelfunctie zijn: inzetten reserve-personeel en -materieel, missen aansluiting, vertragingen, perronwijzigingen i.v.m. overstappen.

Hierbij kunnen ook elementen uit het servicemodel worden meegenomen, zoals opgesteld in Ruiter [29]. Indien vertragingen worden meegenomen in de boetefunctie moet worden bekeken in hoeverre de vertraging waarmee ze vertrekken wordt geteld of de vertraging waarmee ze op volgende verkeersregelpunten aankomen.

- **onzekerheid:** Er kan hierbij worden gedacht aan een verkeersplan dat bestaat uit intervallen in plaats van tijdstippen, zoals al vermeld bij het onderwerp tijd. Er moet immers rekening worden gehouden met de onzekerheid van de conflicten in de toekomst en met de onzekerheid van de voorspelde aankomst- en vertrektijden van de ritten. Verder kan de lengte van een tijdsinterval groter genomen worden naar mate de event verder in de tijd ligt. Ook kan, zoals reeds opgemerkt bij planhorizon een kans worden toegekend aan het optreden van een conflict. Deze kans kan dan ook weer gebaseerd worden op de overlapping van de intervallen en de lengte ervan. Een ander idee is te kijken naar de kans van optreden van de conflicten en pas ingrijpen als de kans groot (groter dan een drempelwaarde) wordt.
- **omvang verkeersregelgebied:** De aard van het probleem (en de mogelijke oplossingsstrategie) wordt sterk beïnvloed door het aantal treinen dat binnen een verkeersregelgebied ingepland moet worden en dus van het aantal verkeersregelpunten dat tot één verkeersregelgebied wordt samengevoegd en hun individuele grootte.

2.2.2 Klassen van oplosmethodes

Er zal nu getracht worden een ruwe classificatie te maken van de oplosmethodes, voor wanneer er besloten wordt het verkeersplan bij te regelen omdat er conflicten zijn geconstateerd. Conflicten die ontstaan door het toevoegen van nieuw binnengekomen informatie over de ritten worden primaire conflicten genoemd. Aangezien het niet noodzakelijk zo hoeft te zijn dat bij elk geconstateerd conflict er direct een herplanning plaatsvindt en een vertraging meerdere conflicten kan veroorzaken, kunnen er meerdere primaire conflicten in het verkeersplan voorkomen. Conflicten die ontstaan bij het oplossen van de primaire conflicten worden secundaire (of vervolg-) conflicten genoemd en zo voort. Bij het oplossen van geconstateerde conflicten kan worden gekozen uit de volgende drie strategieën:

1. Vinden van een toegelaten oplossing voor een primair conflict via toepassing van een verzameling (eenvoudige) verkeersregels. Hierbij worden voornamelijk beslissingen genomen over de volgorde van treinen en het wel of niet handhaven van aansluitingen aan de hand van eenvoudige regels. Er wordt dus niet gekeken naar de gevolgen van de conflicten.

Eigenschappen:

- één primair conflict per keer
- geen planhorizon
- geen rekening houden met vervolgconflicten

- beperkte verzameling routes
- beperkte communicatie met andere verkeersregelpunten
- geen doelfunctie
- geen onzekerheid
- vaste tijdstippen of tijdvensters
- grote verkeersregelgebieden mogelijk

Technieken: Bij deze strategie kan gedacht worden aan beslisregels die volgen uit een 'brainstorm-sessie'. Ook kan op een meer kwantitatieve manier regels en drempels worden gecreëerd analoog aan het in sectie 2.1 behandelde artikel van Carey & Kwiecinski [5]. De techniek uit dit artikel kan ook 'on-line' worden gebruikt, waardoor hij valt onder de volgende strategie. Aan deze oplossingsmethoden kleven gevaren zoals het optreden van deadlock-situaties.

2. Vinden van toegelaten oplossing via de conflictsgewijze werkwijze, waarmee wordt bedoeld dat telkens het eerst optredende primaire conflict wordt bekeken. Er wordt hierbij een oplossing gezocht die, rekening houdend met de gevolgen ervan in de tijd, de beste resultaten geeft, zonder direct rekening te houden met andere primaire conflicten.

Eigenschappen:

- één primair conflict per keer
- vast of variabel planhorizon
- rekening houden met gevolgconflicten
- (beperkte) verzameling routes
- communicatie met ander verkeersregelpunten
- doelfunctie gedefinieerd
- onzekerheid mogelijk
- tijdvensters mogelijk
- grote verkeersregelgebieden mogelijk

Technieken Een voorbeelden van deze oplosmethode zijn het CS/BO-systeem (zie Gouweloos [14]), de kennisaanpak van Schaefer & Pferdmenges [31] of Satoh & Tomii [30] en de aanpak via dynamisch programmeren van Overkamp, van Schuppen & de Waal [24].

3. Vinden van toegelaten oplossing via de horizonsgewijze werkwijze waarbij, wederom binnen een eindige planhorizon, wordt gezocht naar een simultane oplossing voor de

primaire conflicten. Dit levert voor de gehele planhorizon een uitvoerbaar verkeersplan en voorkomt deadlocksituaties, die ontstaan door achtereenvolgens een aantal beslissingen te nemen.

Eigenschappen:

- vast planhorizon
- primaire conflicten worden simultaan opgelost
- verzameling routes of alle mogelijke routes
- communicatie met andere verkeersregelpunten
- doelfunctie gedefinieerd
- onzekerheid mogelijk
- tijdvensters mogelijk
- beperkte grootte verkeersregelgebieden

Technieken: Bij deze strategie kan als wiskundige methode gedacht worden aan de technieken die ontwikkeld zijn voor *DONS* zoals Odijk [23] en Schrijver & Steenbeek [32], weighted node packing probleem zoals in Zwaneveld [37], scheduling technieken of combinaties hiervan. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de verstoring geheel binnen de planhorizon wordt opgelost. De planhorizon is immers een deelverzameling van de gehele dienstregeling, dus na het aanbrengen van veranderingen binnen de planhorizon en het weer samenvoegen met het vervolg van de dienstregeling dient het geheel uitvoerbaar te zijn.

Voor Basis zijn in principe alle drie de klassen vruchtbare bodems. De tweede klasse wordt echter, ook in de literatuur, voornamelijk gebruikt voor beslissingsondersteuning, waarbij de uiteindelijke keuze wordt gemaakt door een beslisser (de verkeersleider) die verder kan kijken dan het systeem. De eerste, meest eenvoudige, klasse wordt nu voornamelijk gebruikt, waarbij bij conflicten via een prioriteitsregel één van de treinen voor wordt gelaten. Het idee van dit project is juist om te kijken of er niet iets meer gedaan kan worden. In dit licht lijkt de derde klasse het meest geschikt als uitgangspunt voor een zelfbeslissend systeem. Dit als antwoord op het eerste en tweede punt in de vraagstelling.

Hoofdstuk 3

Opzet modellering verkeersregeling

In dit hoofdstuk zal, aan de hand van de punten in het vorige hoofdstuk, de opzet voor de modellering van de verkeersregeling worden bepaald. Hiertoe zal er eerst verdere invulling worden gegeven aan de communicatie tussen verschillende verkeersregelpunten en zal er aangegeven worden welke informatie hiervoor nodig is.

3.1 Communicatie

Als iedere lokale verkeersregelaar een zo optimaal mogelijke treinenloop creëert binnen zijn verkeersregelgebied, is het lang niet vanzelfsprekend dat ook het totaal, gezien over het hele gebied waarover gesimuleerd wordt, (dichtbij) optimaal is. De mate van optimaliteit van de conflictoplossing zal voor een deel een zaak zijn van de mate en vorm van communicatie tussen verschillende verkeersregelaars. Er kan hierbij worden gedacht aan informatie over hoe lang de bereikbaarheid is, wanneer er voor het eerst inhaal mogelijkheden zijn en welke aansluitingen in de volgende verkeersregelpunten liggen. In eerste instantie kunnen voor de communicatie vier opties onderscheiden worden:

1. Extra randvoorwaarden zijn per lokale verkeersregelaar gegeven.
2. Een lokale verkeersregelaar haalt extra randvoorwaarden en/of prioriteiten op bij zijn burens of bij de globale verkeersregelaar.
3. Een lokale verkeersregelaar lanceert plannen, waarvan de secundaire consequenties door de burens worden berekend.
4. Een lokale verkeersregelaar lanceert plannen, waarvan de secundaire consequenties door de globale verkeersregelaar worden berekend.

De laatste twee opties lijken moeilijk realiseerbaar. Hoewel het idee is dat deze gebruikt worden bij zeer kleine verkeersregelgebieden is de kans groot dat je, zeker bij het derde punt, belandt in een (oneindig) iteratief proces, waarvan convergentie niet te voorspellen valt.

Voorbeelden voor de eerste optie zijn:

- volgorde van ritten op de vrije baan mag niet veranderd worden.
- een (langzame) trein mag voor een andere (snelle) trein de vrije baan betreden als de vertraging van de tweede trein een drempelwaarde overschrijdt en de eerste trein geen vertraging heeft¹.
- IR of IC-treinen hebben een hogere prioriteit omdat ze vaak verderop betrokken zijn bij een (krappe) aansluiting.

De tweede optie lijkt realiseerbaar en tevens realistisch genoeg. Deze kan worden gezien als een specificering van de eerste optie, waarbij aangrenzende lokale verkeersregelaars randvoorwaarden creëren in de vorm van verzoeken of eisen zoals:

- trein x voor trein y .
- trein x voor tijdstip t in verband met aansluiting.
- trein x na tijdstip t in verband met drukte.

Het niet voldoen aan de opgegeven eisen zal worden bestraft met boetes, waarvan de hoogte voor alle lokale verkeersregelaars is vastgelegd.

Bij de tweede en derde optie moet nog worden opgemerkt dat er geen uitspraken worden gedaan of een naburige lokale verkeersregelaar bij het geven van eisen, wensen of meningen alleen kijkt naar zijn eigen verkeersregelgebied, of dat hij op zijn beurt zijn burens benadert. Zo kan het bijvoorbeeld zijn dat een mogelijk te vertragen rit geen belangrijke aansluiting heeft in een naburig verkeersregelgebied, maar wel in het gebied daaraan grenzend. Dit kan natuurlijk ook worden opgelost door communicatie met de globale verkeersregelaar, die dan een bepaalde prioriteitswaarde aan deze rit meegeeft.

3.2 Informatie

Voor het opbouwen van het lokale verkeersplan, voor de afhandeling van conflicten en voor de optimalisering van de treinenloop binnen zijn lokaal verkeersregelgebied, moet de lokale verkeersregelaar kunnen beschikken over een aantal informatiestromen. Deze zijn (met hun leverancier):

- Logistiek plan
 - materieelbindingen
 - personeelbindingen

¹een voorbeeld hiervan wordt gevonden in Overkamp, van Schuppen & de Waal [24]

- materieelvoorraden
- Globaal verkeersplan
 - ritaansluitingen
 - punctualiteit (tijdsvensters)
 - (gewenste) halteringsperron, indien dat vast staat
- Globaal verkeersplan of naburige lokale verkeersplannen
 - externe voorwaarden en prioriteiten naburige lokale verkeersregelaars
- Verkeersregelpunten en bereikbaarheden
 - huidige toestand eigen verkeersregelpunten
 - beperkingen door infrastructuur
- Lokale verkeersplan
 - toekomstige toestand eigen verkeersregelpunten

Met deze informatie moet de lokale verkeersregelaar in staat zijn, bij het optreden van conflicten, een voor zijn verkeersregelgebied optimale treinenloop te creëren rekening houdend met de wensen en eisen van naburige verkeersregelgebieden.

Het lokale verkeersplan moet kunnen beschikken over de volgende informatiestromen (met hun leverancier):

- Zichzelf
 - planregels
- Rit
 - voorspelling aankomsttijd
 - in- en uitrijspoor
 - voorspelling vertrektijd
- Verkeersregelpunt
 - detailroutes; de beste detailroute en eventuele alternatieve routes
 - beperkingen door infrastructuur

Met deze informatie moet het verkeersregelpunt in staat zijn de planregels actueel te houden en dreigende conflicten te signaleren.

3.3 Uitgangspunten

Bij het bepalen van de modellering zal een aantal aspecten in acht genomen moeten worden. Deze hangen nauw samen met de genoemde punten in paragraaf 2.2.1. Hieronder zal worden uiteengezet welke beslissingen zijn genomen die als uitgangspunten gelden voor het model dat in de volgende paragraaf zal worden bepaald.

Ten eerste geldt dat in BASIS de grootte van de verkeersregelpunten niet gedefinieerd is. De verkeersregelpunten variëren van een aansluiting, waar twee sporen samenkomen, tot een groot station als Utrecht CS. Bij Utrecht CS spelen heel andere problemen, waarbij routing en volgordes binnen het station het grootste probleem zijn. Hierbij geldt vaak dat het vinden van een andere rijweg een veel goedkopere en betere oplossing is, dan het vertragen van een trein. Het herrouteren is al een probleem op zich, waardoor plannen voor een groot verkeersregelgebied, zoals bijvoorbeeld gebeurt bij MARCO, onmogelijk lijkt. Om de geografische horizon te beperken zal een verkeersregelgebied in het vervolg bestaan uit één verkeersregelpunt en zal de mate van detail, wederom in tegenstelling tot MARCO, groot zijn.

Ook moet er rekening gehouden worden met de onzekerheid die de ritten ondervinden, omdat geldt dat de rij- en halteringstijd onzeker zijn. Binnen een verkeersregelpunt is het daarom niet voor de hand liggend een lange planhorizon aan te houden. De onzekerheid is ook een reden de planning te beperken tot één verkeersregelpunt, omdat geldt dat een lokale verkeersregelaar niet kan overzien welke beslissingen in een naburig verkeersregelpunt worden genomen, aangezien daar ook weer verkeersstromen uit andere richtingen aankomen. Op de vorm van de planhorizon wordt verder teruggekomen in de volgende paragraaf.

uitgangspunt 1: *De planhorizon in geografische omvang wordt klein gehouden: de planning wordt gemaakt voor alle verkeersregelpunten afzonderlijk en is gedetailleerd.*

uitgangspunt 2: *De planhorizon in de tijd wordt klein gehouden.*

Nauw hiermee samenhangend is de communicatie met de andere lokale verkeersregelaars. Hiervoor geldt dat oneindig circulerende informatiestromen niet gewenst zijn. De communicatie over mogelijke wijzigingen in het verkeersplan vindt slechts plaats met naburige lokale verkeersregelaars, waarbij deze onderling geen contact hebben over deze wijzigingen. Indien er vlak achter een buur een belangrijk verkeersregelpunt ligt, kan ook met zijn lokale verkeersregelaar worden gecommuniceerd.

uitgangspunt 3: *De communicatie vindt plaats met naburige verkeersregelaars, volgens punt 2 in paragraaf 3.1 .*

De oplossingsmethode die gebruikt zal worden zal uit klasse 3, zoals gedefinieerd in het vorige hoofdstuk, komen, waarbij er zal worden gezocht naar een gezamenlijke oplossing voor de primaire conflicten.

uitgangspunt 4: *De oplossingsmethode komt uit klasse 3.*

Dit project beperkt zich tot het zeer snel oplossen van kleine verstoringen in de treinenloop. Hierbij is een structuur zichtbaar, waar de nieuwe oplossing dichtbij de huidige situatie gezocht moet worden. Een methode die dit gebruikt, bijvoorbeeld een lokale zoekmethode, zal de voorkeur hebben boven een methode die van nul af begint.

uitgangspunt 5: *De oplossingsmethode moet gebruik maken van de speciale structuur van het probleem.*

Modelleringen die gebruikt zijn in eerder NS/Railned onderzoek zijn zoals besproken in het vorige hoofdstuk die van *DONS* en *STATIONS*. De eerste lijkt niet in dit probleem te gebruiken. De modellering van *STATIONS* lijkt wel te voldoen. Afgezien van de periodici-teit kan met deze modellering een nieuw lokaal verkeersplan worden gemaakt waarbij extra alternatieven voor de tijd moeten worden toegevoegd en waarbij alleen rekening wordt gehouden met de naburige verkeersregelpunten. Deze modellering scoort op alle punten hierboven genoemd.

Wanneer van het routeren wordt afgezien en er gekozen wordt voor een grote(re) planho-rizon (minder aandacht voor onzekerheden) zijn andere methodes, zoals de CWI-methode en de MARCO-methode, goed bruikbaar en deze methoden zullen dan (globaal gezien) betere oplossingen geven.

3.4 Ontwerp verkeersregeling

Aan de hand van de uitgangspunten uit de vorige paragraaf wordt nu een globaal model voor de verkeersregeling gegeven. De invulling en modellering van de componenten van dit model vinden plaats in de volgende hoofdstukken.

3.4.1 Inleiding

Beschouw een willekeurig (deel van het) spoorwegnetwerk, dat onder beheer valt van de verkeersregelaar, zoals gedefinieerd in BASIS. Bij het uitvoeren van de treindienst op dit netwerk hebben we te maken met een vastgesteld verkeersplan $\bar{\tau}$, waar de planning in de tijd mee wordt bedoeld, met een, binnen verkeersregelpunten, geplande routing $r(\bar{\tau})$, de routing die plaats vindt via *Stations* bij verkeersplan $\bar{\tau}$ en met een vastliggende rij van lokale bereikbaarheden. Met routing binnen een verkeersregelpunt wordt hier de planning in de ruimte bedoeld, oftewel de rijweg van de rit binnen het lokaal verkeersregelgebied, van het I/U-punt waar de rit dat gebied binnenkomt, via een eventueel perronspoor, naar het I/U-punt waar de rit het verkeersregelgebied weer verlaat. De eventueel te gebruiken globale bereikbaarheden tussen verkeersregelpunten liggen volgens de definitie in BASIS vast en kunnen niet veranderd worden. Dit is namelijk niet de bevoegdheid van de lokale verkeersregelaar. Op het moment dat het bericht van een verstoring bij het lokale

verkeersplan binnenkomt, vindt een waarneming τ_0 plaats van de situatie op dat moment. Vanuit deze waarneming moet, eventueel, een nieuw verkeersplan τ berekend worden die uitvoerbaar is. Dit leidt tot twee basisvragen voor het probleem:

1. Wanneer leidt een verstoorde situatie tot het maken van een nieuw verkeersplan (Conflictsignalering)?
2. Hoe wordt het nieuwe verkeersplan gemaakt (Creëren nieuw verkeersplan)?

Het voordeel van deze modellering is dat de onzekerheid over de toekomst in de eerste vraag gelegd kan worden. Op het moment dat besloten wordt dat een nieuw plan moet worden gemaakt, wordt aangenomen dat de toestand deterministisch is, voor wat betreft de aankomsten en vertrekken binnen het betreffende verkeersregelpunt. Er kan nog wel onzekerheid zijn betreffende de verdere loop van deze ritten.

Het tweede punt kan worden samengevat in een wiskundig model:

$$\min f(\bar{\tau}, \tau) \tag{3.1}$$

onder de voorwaarden:

$$\left. \begin{array}{l} \tau \text{ realiseerbaar uit } \tau_0 \\ r(\tau) \text{ realiseerbaar} \end{array} \right\} \tag{3.2}$$

met $f(\cdot)$ een willekeurige functie die een waarde geeft aan een afwijking van het oorspronkelijke plan en aan het optreden van conflicten.

Dit model optimaliseren voor een verkeersregelgebied lijkt een moeilijke opgave, zeker naarmate de omvang van een verkeersregelgebied toeneemt. Voor simulatie lijkt een iets eenvoudigere aanpak raadzaam, zeker in verband met de rekentijd. Mede daarom is gekozen voor het optimaliseren van het lokale verkeersplan voor elk verkeersregelpunt afzonderlijk, wel rekening houdend met de naburige verkeersregelpunten.

3.4.2 Uitwerking en taakverdeling

In de modellering zoals hierboven uitgelegd kunnen er verschillende taken worden herkend voor verschillende besturingslagen binnen een verkeersregelgebied. Deze taken worden beschreven in deze paragraaf. Verder zal aandacht moeten worden besteed aan de communicatie tussen de lokale verkeersregelaars.

Lokaal verkeersplan

Elk lokaal verkeersplan doet (voortdurend) aan conflictsignalering. Het registreert de huidige toestand in zijn verkeersregelpunt en krijgt voorspellingen binnen van ritten die zijn verkeersregelpunt aandoen. Indien er zich afwijkingen voordoen van de oorspronkelijke

planregels worden deze door het verkeersregelpunt geaccepteerd en vermeld in de planregels. Dit geldt bijvoorbeeld voor vertragingen en volgordewijzigingen op de globale bereikbaarheden die naar het verkeersregelpunt leiden. Indien voorspellingen van ritten strijdig zijn met de werkelijke situatie² worden deze door het lokaal verkeersplan aangepast. Vervolgens wordt er gekeken of die afwijkingen conflicten tot gevolg hebben. Voor elk gesignaleerd conflict wordt bijgehouden wat de kans is dat deze ook daadwerkelijk optreedt. Als deze kans een (van tevoren) bepaalde drempelwaarde overschrijdt wordt dit gemeld aan de lokale verkeersregelaar. Naarmate de drempelwaarde lager is zal de onzekerheid groter zijn en bestaat de kans dat het lokale verkeersplan (vaak) onterecht bijgestuurd wordt, maar zijn de mogelijkheden tot schuiven groter.

Lokale verkeersregelaar

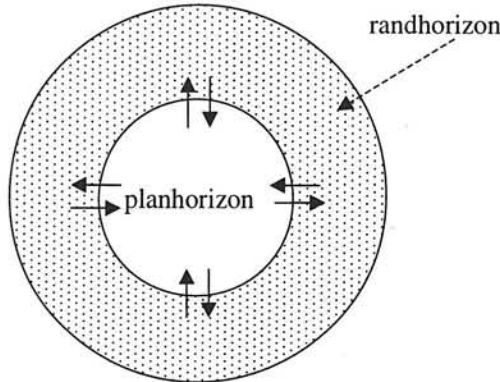
Voor het verkeersregelpunt waar het conflict optreedt wordt vervolgens door de lokale verkeersregelaar een uitvoerbaar verkeersplan voor zijn verkeersregelgebied bepaald (in plaats van simultaan voor alle verkeersregelpunten). Hij zal eerst, met behulp van de actuele situatie in het verkeersregelpunt en de meest recente informatie over de lokale verkeersplannen van de naburige verkeersregelpunten, een probleeminstantie maken. Vervolgens wordt deze probleeminstantie opgelost, waar een nieuw uitvoerbaar verkeersplan uit volgt.

Communicatie

De communicatie tussen de lokale verkeersregelaars kan op twee manieren plaatsvinden, maar komt in beide gevallen neer op het waarderen van de gevolgen van veranderingen die aangebracht worden in het lokale verkeersplan. In het eerste geval zal de lokale verkeersregelaar zijn naburige verkeersregelaars vragen de alternatieven te waarderen, op grond van hun actuele verkeersplan, in het tweede geval bepaalt de verkeersregelaar zelf aan de hand van de actuele naburige verkeersplannen de waarde van de alternatieven. In het vervolg van dit rapport zal steeds worden uitgegaan van de laatste methode, maar kan even zo goed overal door de eerste methode worden vervangen.

Ga als voorbeeld voor de eerste situatie uit van twee naburige verkeersregelpunten *A* en *B*. Bij een mogelijke aanpassing van de treinenloop in verkeersregelpunt *A* zal de lokale verkeersregelaar van *B*, voor alle betrokken ritten van *A* naar *B*, aangeven hoe 'erg' hij vertraging van de betreffende rit vindt, door middel van een boete op een bepaalde vertraging of een boetefunctie voor alle vertragingen. Deze werkwijze zal uitvoerig worden behandeld in het volgende hoofdstuk. Merk op dat deze procedure identiek kan worden gedaan voor communicatie tussen naburige lokale verkeersregelgebieden, indien een verkeersregelgebied uit meerdere verkeersregelpunten bestaat. In de praktijk zal, wanneer een lokaal verkeersregelgebied om een boetefunctie gevraagd wordt voor een bepaalde rit, de lokale verkeersregelaar zijn mening voor het hele verkeersregelgebied geven, gebaseerd op de situatie in het verkeersregelpunt waar deze rit als eerste aankomt.

²dit kan voorkomen indien een snelle trein achter een langzame trein rijdt; de snelle trein voorspelt (volgens referentiemodel BASIS) een aankomsttijd alsof hij ongehinderd kan doorrijden



Figuur 3.1: Randhorizon en planhorizon met informatiestromen

Planhorizon

In paragraaf 3.3 is gesteld dat de planhorizon klein wordt gehouden, zowel in de tijd als geografisch. Deze twee planhorizons hebben een structuur die gelijk is: in een deel van de horizon mogen wijzigingen worden aangebracht (de planhorizon), uit het andere deel mag alleen informatie worden gehaald (de randhorizon). In figuur 3.1 staat dit schematisch weergegeven.

De horizon in de tijd geeft aan dat er een verkeersplan moet worden gemaakt, waarbij er alleen wijzigingen mogen worden aangebracht in bijvoorbeeld de eerste 20 minuten (planhorizon). Deze wijzigingen moeten echter samen met de geplande treinbewegingen buiten die horizon (in de randhorizon) een uitvoerbaar plan opleveren.

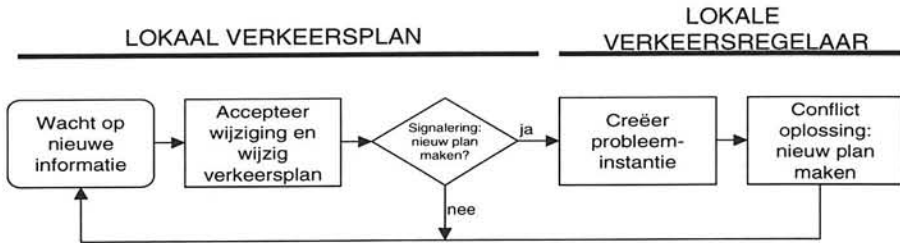
Geografisch gezien wordt er een uitvoerbaar verkeersplan gecreëerd voor elk verkeersregelpunt afzonderlijk (planhorizon), waarbij wel informatie kan worden gehaald uit de verkeersplannen van de verkeersregelpunten uit de omgeving (randhorizon).

3.4.3 Conclusie

Het probleem van verkeersregeling wordt opgedeeld in twee stappen, namelijk de basisvragen uit het begin van deze paragraaf:

1. Conflictsignalering
2. Creëren nieuw verkeersplan

Voor de eerste stap zal bepaald moeten worden wanneer een gebeurtenis als een conflict wordt gezien en wanneer een conflict serieus genoeg is om over te gaan tot het creëren van



Figuur 3.2: Verkeersregeling

uitvoerbaar verkeersplan. Deze activiteit, uitgevoerd door het lokale verkeersplan, zal terug te vinden zijn in hoofdstuk 4.

Voordelen van deze modellering zijn dat de groottes van de verkeersregelgebieden geen invloed hebben op de oplosmethode en dat de hoeveelheid complex rekenwerk afneemt, aangezien het bepalen van een optimaal plan voor een verkeersregelpunt (veel) eenvoudiger is dan het bepalen van een optimaal plan voor een verkeersregelgebied. Het opdelen van een verkeersregelgebied heeft echter wel als nadeel dat er waarschijnlijk meer wordt afgeweken van het optimum.

Terugkoppelend naar het vorige hoofdstuk kan worden gezegd dat voor stap 2, uitgevoerd door de lokale verkeersregelaar, in de modellering gekozen zal worden voor een methode uit klasse 3 van de oplosstrategieën, zoals gedefinieerd in paragraaf 2.2.2, waarbij geen tijdsvensters worden gebruikt en de onzekerheid niet wordt meegenomen (dat zit in de eerste stap). Er zal geprobeerd worden planning in tijd en planning in ruimte gelijktijdig te laten plaatsvinden, waarbij een beperkte verzameling routes wordt meegenomen. Er zal geprobeerd worden, in aansluiting bij *Stations*, dit te modelleren als bijvoorbeeld een weighted node packing probleem. Hierbij zal een node een combinatie van trein, route en tijdstip voorstellen. Een probleem hierbij is dat de kosten die veroorzaakt worden niet alleen uit de nodes volgen, maar ook uit combinaties van nodes.

Voorbeeld 2 Beschouw een situatie waarbij een langzame (1) en een snelle trein (2) een verkeersregelpunt A willen verlaten over dezelfde globale bereikbaarheid naar verkeersregelpunt B. A kan vervolgens bijvoorbeeld vragen hoe erg B het vindt als 1 vertrekt op tijdstip x en als 2 vertrekt op tijdstip y . Echter als daardoor trein 2 direct achter trein 1 vertrekt, zal trein 2 een extra vertraging oplopen. Deze vertraging is een direct gevolg van de combinatie van vertrektijden van de treinen.

Het toevoegen van kosten op de takken leidt tot het zoeken naar een maximum gewogen clique. De uitwerking van de tweede stap is terug te vinden vanaf hoofdstuk 5.

Hoofdstuk 4

Conflictsignalering

Zoals gezien in paragraaf 3.4.3, is de modellering van de verkeersleiding opgedeeld in twee stappen. De eerste stap hierbij is het bepalen wanneer een conflict aanleiding geeft tot het aanpassen van het verkeersplan. In dit hoofdstuk wordt er aan deze stap invulling gegeven.

4.1 Inleiding

Op het moment dat een rit zijn aankomsttijd aan het lokale verkeersplan doorgeeft is dit een voorspelling waarbij onzekerheid een rol speelt. Als deze voorspelling een conflict in het verkeersplan veroorzaakt is het lang niet zeker dat het conflict ook inderdaad optreedt. Het kan namelijk voorkomen dat wanneer de rit echt aankomt dit eerder is dan hij had voorspeld, waardoor het conflict niet optreedt. Bovendien kan de andere gebeurtenis die in het conflict een rol speelt ook nog in de tijd variëren.

Een idee dat hierbij 'als natuurlijk' naar voren komt is het bepalen van de kans dat een conflict plaats zal vinden. Aangezien we niet te vaak onnodig het lokale verkeersplan willen aanpassen, zullen we een conflict pas serieus nemen als de conflictkans een drempelwaarde overschrijdt. Om het begrip conflictkans verder te kunnen vastleggen zijn eerst drie definities nodig.

Definitie 7 Opvolgtijd – *Met de opvolgtijd (τ_{ij}) wordt de minimale tijd bedoeld die tussen twee treinen moet zitten wanneer deze hetzelfde stuk infrastructuur (willen) gebruiken.*

Definitie 8 Treinbeweging – *Een treinbeweging is een deel van een rit binnen een verkeersregelpunt, bestaande uit een treinnummer, soort beweging en een bestemming of herkomst aan de rand van het verkeersregelpunt (I/U-spoor).*

Definitie 9 Event – *Onder een event wordt een combinatie van een treinbeweging, een detailroute en een tijd verstaan. Een event zoals vermeld in het verkeersplan wordt een planevent genoemd.*

Als een rit aankomt bij een verkeersregelpunt en, na haltering, weer vertrekt, dan zijn er twee treinbewegingen en dus worden voor deze rit twee events gepland. Voorbeeld voor deze

treinbewegingen zijn (trein 15710, aankomst, Uto_R1) en (trein 15710, vertrek, Uto_R2). De bijbehorende planevents kunnen dan zijn:

- (trein 15710, aankomst, Uto_R1), route 14652 (Uto_R1 naar perron 3), tijd 839.
- (trein 15710, vertrek, Uto_R2), route 14666 (perron 3 naar Uto_R2), tijd 844.

Deze planevents kunnen ontstaan zijn nadat de rit zich heeft aangemeld of ze volgen uit het globale verkeersplan. De tijd kan hierbij de voorspelde tijd zijn of een aangepaste tijd door de lokale verkeersregelaar.

4.2 Conflictdefinitie

Alvorens bepaald kan worden of een conflict plaats vindt, zal bekend moeten zijn hoe een conflict gesignaleerd wordt. Hiervoor zal voor alle conflicten die in de simulatie van belang zijn, zie paragraaf 1.4, aangegeven worden hoe het conflict opgespoord kan worden.

1. Conflicterende rijwegen: twee planevents maken aanspraak op hetzelfde stuk infrastructuur en de opvolgtijd wordt geschonden.
2. Bezet perronspoor: de tijd van een planevent (plus opvolgtijd) van een aankomende trein bij een bepaald perron is eerder dan de tijd van een planevent van een andere, vertrekkende, trein bij dat perron, bij gegeven volgorde van haltering.
3. Trein past niet (volledig) langs perron.
4. Verbroken reizigersaansluiting: van twee planevents met een reizigersaansluiting gedefinieerd tussen de bijbehorende ritten is de aankomsttijd (plus overstaptijd) van de aankomende trein later dan de vertrektijd van de vertrekkende trein.
5. Verbroken materieel/personeeelaansluiting: gelijk aan vorige punt. Hierbij dient te worden opgemerkt dat een doorgaande rit (eventueel na haltering) ook een materieelaansluiting heeft.
6. Te korte halteringstijd: Het tijdsverschil tussen de aankomst- en vertrektijd van twee planevents voor dezelfde rit is te klein.
7. Vertraging.

Het conflict dat een trein niet langs het perron past hoeft in deze analyse niet te worden meegenomen, omdat deze, bij constatering, altijd met kans één optreedt. De vertraging is ook altijd een conflict maar is niet van belang, tenzij zij één van de andere conflicten tot gevolg heeft. Een vertraging, en ook andere conflicten op bereikbaarheden naar het verkeersregelpunt, worden als gegeven beschouwd en door het lokale verkeersplan verwerkt in de planregels.

De conflicten kunnen voor dit probleem zelfs nog verder geclusterd worden tot twee soorten:

- **infraconflict**

- conflicterende rijwegen
- bezet perronspoor

kenmerk: twee planevents bevatten routes die gelijk zijn of niet gelijktijdig kunnen worden gebruikt.

conflictkans: de kans dat de opvolgtijd wordt geschonden

- **aansluitingconflict**

- verbroken reizigersaansluiting
- verbroken materieel/personeelaansluiting
- te korte halteringstijd

kenmerk: de ritten van twee planevents hebben een aansluitingsrelatie.

conflictkans: de kans dat de aankomsttijd van een planevent (plus overstap- of halteringstijd) groter is dan de vertrektijd van een ander planevent.

Zoals reeds opgemerkt speelt onzekerheid een rol in het treinverkeer. Indien er volgens de planregels sprake is van een conflict in de toekomst, hoeft deze niet plaats te vinden. Omgekeerd kunnen twee planevents een conflict krijgen, hoewel daar (nog) geen sprake van is volgens de planregels in het lokale verkeersplan. Alleen de eerste situatie zal in dit rapport beschouwd worden als een conflict¹.

Definitie 10 Conflict – *Er is sprake een conflict als bij het uitvoeren van de huidige planregels een infra- en/of aansluitingconflict zou optreden in of na het verkeersregelpunt, ook al is de kans van daadwerkelijk optreden klein.*

4.3 Conflictkans

4.3.1 Notatie

Ter bepaling van de conflictkans wordt de aanname gemaakt dat de lengtes van de opvolgtijden vast zijn voor een bepaalde combinatie van treinbewegingen. De lengtes kunnen dus best per combinatie verschillen, maar gegeven een combinatie zijn de lengtes vast. De kansverdeling van de aankomst- of vertrektijd is bekend en kan afhankelijk zijn van de tijd, bijvoorbeeld door de standaardafwijking een functie van de tijd te laten zijn.

Definieer de volgende variabelen:

¹zie ook paragraaf 5.6

A_i	stochastische aankomsttijdstip rit i
V_i	stochastische vertrektijdstip rit i
\bar{V}_i	stochastische tijdstip dat rit i klaar is voor vertrek
H_{ij}	stochastische haltering-, omkeer- of overstaptijd tussen rit i en rit j (bij haltering geldt $i = j$)
a_i	geplande aankomsttijdstip rit i
v_i	geplande vertrektijdstip rit i
h_{ij}	benodigde, geplande haltering, omkeer- of overstaptijd tussen rit i en rit j

De geplande tijden zijn de tijden zoals vermeld in het lokale verkeersplan en kunnen, door het maken van een nieuw verkeersplan, gewijzigd worden. Het tijdstip dat een rit een stuk infrastructuur claimt zal niet altijd gelijk zijn aan de vertrek- of aankomsttijd. Er wordt echter aangenomen dat dit slechts een constante verschilt, waardoor in het vervolg steeds wordt gepraat over vertrek- en aankomsttijden. Wanneer de tijd tussen de geplande aankomsttijd en de geplande vertrektijd groter is dan de benodigde halterings-, omkeer- of overstaptijd tussen rit² i en rit j , dan wordt dit uitgedrukt door een buffervariabele c_{ij} waarvoor geldt

$$c_{ij} = v_j - a_i - h_{ij}.$$

Het vroegste vertrektijdstip van rit j (het moment dat de rit klaar is voor vertrek) kan nu, bij materieelbinding die gehandhaafd wordt tussen ritten i en j (en alleen dan), worden uitgedrukt in de aankomst- en halteringstijdstippen:

$$\bar{V}_j = A_i + H_{ij}. \quad (4.1)$$

Rit j zal willen vertrekken op tijdstip $v_j = a_i + h_{ij} + c_{ij}$, tenzij de trein nog niet klaar is voor vertrek, omdat $\bar{V}_j > v_j$. Voor het vertrektijdstip geldt in het algemeen

$$V_j = \max(v_j, \bar{V}_j), \quad (4.2)$$

Zo kunnen er nu verschillende relaties worden uitgedrukt in de bovengenoemde variabelen. Voor het handhaven van een reizigersaansluiting tussen rit i en rit j geldt bijvoorbeeld dat:

$$V_j \geq A_i + H_{ij},$$

terwijl, als er geen sprake is van een materieelbinding, in dat geval geldt dat

$$\bar{V}_j = v_j.$$

Een aanname in dit hoofdstuk is dat de aankomsttijdstippen onderling onafhankelijk zijn, hoewel het zeer waarschijnlijk is dat in de praktijk er sprake is van afhankelijkheid.

²bij een doorgaande trein geldt $i = j$

4.3.2 Voorspellingen

In het vervolg van dit hoofdstuk wordt verondersteld dat de rit een aankomsttijd voorspelt en een (vector van) onzekerheidsparameter(s) t doorgeeft, waarmee hij de onzekerheid over de voorspelde aankomsttijd kwantificeert. Voorbeelden hiervoor zijn de kans dat de rit eerder aankomt dan de voorspelde tijd en de kans dat hij later aankomt. Het lokale verkeersplan kan hieruit de kansverdeling afleiden voor de aankomst van deze rit bij zijn verkeersregelpunt.

In de voorbeelden van dit hoofdstuk wordt t gezien als de hoeveelheid tijd die zit tussen het moment van voorspellen en het voorspelde tijdstip. Hoe vroeger van tevoren een voorspelling plaatsvindt, hoe onzekerder deze voorspelling zal zijn. Als bijvoorbeeld op het tijdstip 803 een rit voorspelt aan te komen om 815, dan geldt $t = 12$. Hiermee kunnen de kansverdelingen, die in deze paragraaf volgen, gedefinieerd worden.

Een rit kan ook een hele kansverdeling aan het lokale verkeersplan doorgeven. Een punt hierbij wordt dan wat de voorspelde aankomsttijd wordt. Mogelijkheden hiervoor zijn de verwachte waarde en de mediaan, maar de meest voor de hand liggende is de modus.

Een ander aspect, die hier nauw mee samenhangt, is het voorspellen van een aankomsttijd over een verkeersregelpunt heen. Zolang niet duidelijk is wat de lokale verkeersregelaar van het eerst volgende verkeersregelpunt zal beslissen, is de onzekerheid over de aankomsttijd bij een volgend verkeersregelpunt groot. Dit kan worden meegenomen in de onzekerheidsparameter t , maar ook kan hierbij gedacht worden aan het onderscheiden van twee soorten voorspellingen: voorlopige voorspellingen, gebaseerd op ideeën van de rit zelf, en definitieve voorspellingen, gebaseerd op geplande vertrektijden bij het tussenliggende verkeersregelpunt.

4.3.3 Verdelingen

Met de definities uit de vorige paragrafen kunnen de kansverdelingen van de halteringstijd, aankomsttijd en vertrektijd worden vastgelegd.

Kans op haltering-, overstap- of omkeertijd van maximaal h minuten tussen rit i en rit j :

$$P(H_{ij} \leq h) = F_{H_{ij}}(h) = \int_0^h f_{H_{ij}}(x) dx, \quad (4.3)$$

waarbij $f(\cdot)$ de kansdichtheidfunctie is en $F(\cdot)$ de kansverdelingsfunctie.

Kans op maximaal Δa minuten vertraging bij aankomst rit i gegeven dat de voorspelling t minuten van tevoren wordt gedaan:

$$\begin{aligned} P(A_i \leq a_i + \Delta a | t) &= F_{A_i}(a_i + \Delta a | t) \\ &= \int_{a_i^-}^{a_i + \Delta a} f_{A_i}(x | t) dx, \end{aligned} \quad (4.4)$$

met a^- de vroegst mogelijke aankomsttijd, dat wil zeggen het tijdstip waarop de rit aankomt als echt alles meezit. Voor de aankomstverdeling zal in de praktijk een scheve kansverdeling worden genomen omdat er duidelijk een afknotting is bij a^- , een rit zal in het algemeen namelijk niet veel vroeger aankomen dan het voorspelde tijdstip, terwijl veel later wel goed mogelijk is. In Hertel [15] wordt bijvoorbeeld een Weibullverdeling aangenomen, maar er kan ook gedacht worden aan andere verdelingen zoals de Gamma of Lognormale verdeling. Ook het gebruik van een empirische kansverdeling is goed mogelijk. Een andere bekende aanname is dat de vertraging exponentieel verdeeld is, zoals gebruikt wordt in Weigand [35]. In het vervolg van dit hoofdstuk zal, slechts als voorbeeld, regelmatig een mooie formule worden afgeleid, waarbij de normale of uniforme verdeling wordt verondersteld.

Vervolgens wordt, met (4.1) de kans bepaald dat rit j klaar is voor vertrek voor tijdstip v , gegeven dat de voorspelling t minuten voor de aankomst van rit i wordt gedaan, rit i en rit j een aansluitingsrelatie hebben en i en j gelijk kunnen zijn. De kans op werkelijk maximaal Δv minuten vertraging volgt daaruit:

$$\begin{aligned} P(\bar{V}_j < v|t) &= P(A_i + H_{ij} < v|t) \\ &= \int_0^\infty F_{A_i}(v - h|t) f_{H_{ij}}(h) dh \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$P(V_j \leq v_j + \Delta v|t) = P(\bar{V}_j \leq v_j + \Delta v|t) \text{ met } \Delta v \geq 0 \quad (4.6)$$

4.3.4 Aansluitingconflict

Zoals gezien hebben we bij een aansluitingconflict te maken met twee planevents, waarbij een aansluiting gemist wordt als ze beide optreden. Dit kan een materieel- of personeelaansluiting zijn (de rit gaat verder, of een andere rit vertrekt met dat materieel of personeel) of een reizigersaansluiting. In het eerste geval is het duidelijk dat er gekeken moet worden naar het conflict dat optreedt met de (vaste) geplande vertrektijd, in het tweede geval is er sprake van twee stochastische tijden.

Twee stochastische tijden

Hier is sprake van twee ritten die bij een verkeersregelpunt aankomen en waarvan er minstens één verder gaat. Tussen deze ritten is bijvoorbeeld een reizigersaansluiting gedefinieerd. Dit kan eenzijdig zijn waarbij één rit aansluiting geeft op de andere, of tweezijdig, waarbij de reizigers kunnen overstappen van de ene trein op de andere en omgekeerd. In het tweezijdige geval zal in de praktijk echter vaak één van de twee treinen duidelijk te laat zijn, dus wordt hier volstaan met de eenzijdige variant. De conflictkans is de kans dat de aankomsttijd van de laatst aankomende rit plus de omkeer-, overstap- of halteringstijd groter is dan de vertrektijd van een andere rit. De kans is afhankelijk van het moment dat de voorspellingen van de aankomsttijden zijn gedaan ($t = (t_1, t_2)$):

$$\begin{aligned}
P(\text{aansluitingconflict}|t) &= P(A_i + H_{ij} > V_j|t) \\
&= \int_0^\infty P(A_i > V_j - h|t) f_{H_{ij}}(h) dh \\
&= \int_0^\infty \int_{v_j}^\infty P(A_i > v - h|t) f_{H_{ij}}(h) f_{V_j}(v|t) dv dh \\
&= \int_0^\infty \int_{v_j}^\infty (1 - F_A(v - h|t)) f_{H_{ij}}(h) f_{V_j}(v|t) dv dh \quad (4.7)
\end{aligned}$$

Eén stochastische tijd

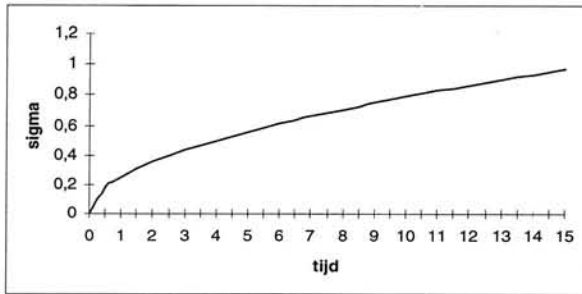
Indien er sprake is van een materieel- of personeelaansluiting, waarbij dezelfde rit doorgaat of een andere rit vertrekt met dit materieel of personeel, dan wordt de vertrektijd van de vertrekkende trein vast verondersteld. Deze vertrektijd kan worden ingevuld in (4.7).

$$\begin{aligned}
P(\text{aansluitingconflict}|t, V_j = v_j) &= P(A_i + H_{ij} > v_j|t) \\
&= \int_0^\infty P(A_i > v_j - h|t) f_{H_{ij}}(h) dh \\
&= \int_0^\infty (1 - F_A(v_j - h|t)) f_{H_{ij}}(h) dh \quad (4.8)
\end{aligned}$$

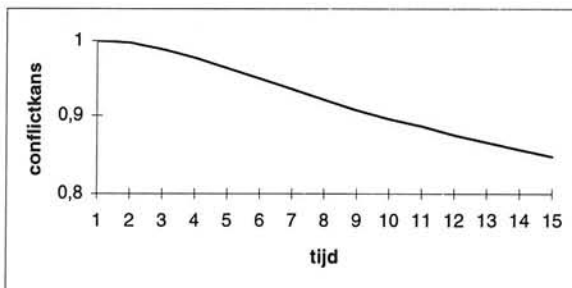
Toepassing 1 Stel (de indices i en j worden in dit voorbeeld weggelaten) dat A normaal (μ_A, σ_A^2) verdeeld is en dat H ook normaal verdeeld is maar dan met parameters (μ_H, σ_H^2) . Definieer vervolgens de stochastische variabele $X = A + H$. De standaardafwijking van A wordt afhankelijk van t verondersteld: $\sigma_A = \sigma_A(t)$. Er geldt dat X normaal verdeeld is met parameters $(\mu_X = \mu_A + \mu_H, \sigma_X^2(t) = \sigma_A^2(t) + \sigma_H^2)$. Vervolgens kan worden afgeleid:

$$\begin{aligned}
P(A + H > v|t) &= P(X > v|t) \\
&= P\left(\frac{X - \mu_X}{\sigma_X(t)} > \frac{v - \mu_X}{\sigma_X(t)}\right) \\
&= 1 - \Phi\left(\frac{v - \mu_X}{\sigma_X(t)}\right)
\end{aligned}$$

Waarbij $\Phi(x)$ de verdelingsfunctie van de standaardnormale verdeling is.



Figuur 4.1: Verloop standaardafwijking in tijd



Figuur 4.2: Conflictkans voorbeeld 3

Voorbeeld 3 Er bestaat een materieelaansluiting tussen twee ritten. De vertrektijd (v) van de vertrekkende rit staat vast. De aankomsttijd (A) van de aankomende rit is onzeker, en wordt normaal (\bar{a}, σ_A^2) verdeeld verondersteld met $\sigma_A = \sigma_A(t) = 0.25\sqrt{t}$ en \bar{a} de voorspelde aankomsttijd, namelijk één minuut later dan oorspronkelijk gepland. In figuur 4.1 staat de standaardafwijking afgezet tegen de T . $T=1$ betekent dat het voorspellingsmoment 1 minuut voor de voorspelde aankomst is. Neem hierbij in ogenschouw dat bij de normale verdeling ongeveer 95% van de kansmassa binnen twee maal de standaardafwijking ligt. Tussen de geplande aankomsttijd en vertrektijd zit drie minuten, wat nodig is voor de overstap, dus H is vast en bedraagt 3 minuten.

De kans op een conflict als de aankomende trein tien minuten voor aankomst voorspelt dat hij een minuut te laat is, is nu: $P(A > v - 3 | t = 10) = 1 - \Phi(-1.264) = 0.8962$. De overige kansen staan afgebeeld in figuur 4.2. Hierbij wordt de voorspelde aankomsttijd constant gehouden.

Wanneer voor de halteringstijd een normale $(3, 0.25)$ verdeling wordt aangenomen, wordt dit $P(A + H > v | t = 10) = 1 - \Phi(-1.069) = 0.8577$.

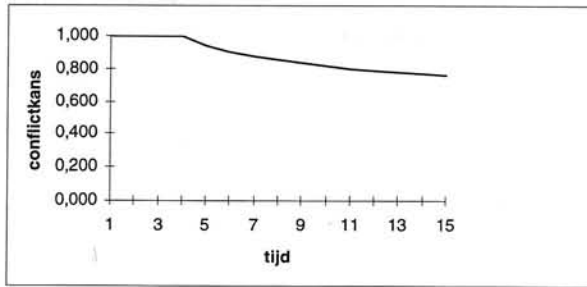
Voorbeeld 4 Er bestaat een materieelaansluiting tussen twee ritten, zoals in voorbeeld 3. De vertrektijd (v) van de vertrekkende rit staat vast. De aankomsttijd (A) van de aankomende rit is onzeker, en wordt uniform $(\bar{a} - 2\sigma, \bar{a} + 2\sigma)$ verdeeld verondersteld, met \bar{a} de voorspelde aankomsttijd en $\sigma = \sigma_A(t)$ zoals in voorbeeld 3. Tussen de aankomsttijd van de eerste rit en de vertrektijd zit volgens het verkeersplan 3 minuten. De conflictkans kan nu simpel worden afgeleid:

$$P(\text{er treedt een conflict op} | t) =$$

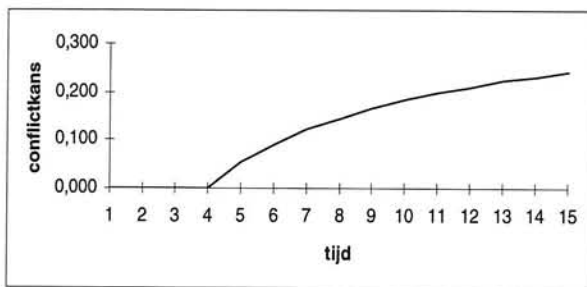
$$P(A > v - 3 | t) = \int_{v-3}^{\bar{a}+2\sigma} \frac{1}{4\sigma} dx = \frac{\bar{a} + 3 + 2\sigma - v}{4\sigma}$$

Voor $t=10$ geeft dit $P(A > v - 3 | t = 10) = 0.816$.

Figuur 4.3 geeft het verloop van de kans in de tijd weer in de situatie dat de aankomende rit voorspelt één minuut te laat binnen te komen. Bij figuur 4.4 daarentegen voorspelt de aankomende rit een minuut te vroeg binnen te komen. Bij een voorspelling dat de rit binnenkomt op het geplande tijdstip, is de kans niet afhankelijk van de tijd en constant 0.5.



Figuur 4.3: Conflictkans homogene verdeling 1 minuut te laat



Figuur 4.4: Conflictkans homogene verdeling 1 minuut te vroeg

4.3.5 Infraconflict

Een infraconflict ontstaat wanneer twee planevents routes hebben die niet gelijktijdig gebruikt kunnen worden en dat toch willen, dat wil zeggen dat de opvolgtijd wordt geschonden.

Twee aankomende ritten

Beschouw twee ritten die bij een verkeersregelpunt zullen aankomen. De ritten geven voorspellingen af over de verwachte aankomsttijd bij het verkeersregelpunt. De aankomsttijd van rit i bij dat verkeersregelpunt is, zoals voorheen, onzeker. De opvolgtijd tussen ritten i en j is τ_{ij} als rit i eerst is. De conflictkans is de kans dat de laatst aankomende rit de opvolgtijd schendt en is afhankelijk van de tijdstippen $t = (t_1, t_2)$ waarop de voorspellingen zijn gedaan:

$$P(\text{infraconflict}|t) = P(A_1 \leq A_2 \leq A_1 + \tau_{12}|t, A_1 \leq A_2) + P(A_2 < A_1 \leq A_2 + \tau_{21}|t, A_2 < A_1) \quad (4.9)$$

$$= P(0 \leq A_2 - A_1 \leq \tau_{12}|t, A_1 \leq A_2) + P(-\tau_{21} \leq A_2 - A_1 < 0|t, A_2 < A_1) \\ = P(-\tau_{21} \leq A_2 - A_1 \leq \tau_{12}|t) \quad (4.10)$$

Het eerste deel van de rechterterm van (4.9) geeft de kans aan dat, gegeven dat 1 als eerste aankomt, A_2 in het interval $(A_1, A_1 + \tau_{12})$ valt. Het tweede deel geeft, gegeven dat 2 het eerste aankomt, de kans dat A_1 in het interval $(A_2, A_2 + \tau_{21})$ valt. Dit kan nog verder worden uitgewerkt tot:

$$P(\text{infraconflict}|t) = \int_{-\infty}^{\infty} P(-\tau_{21} \leq A_2 - a \leq \tau_{12}|t) f_{A_1}(a|t) da \\ = \int_{-\infty}^{\infty} (F_{A_2}(a + \tau_{12}|t) - F_{A_2}(a - \tau_{21}|t)) f_{A_1}(a|t) da \quad (4.11)$$

Toepassing 2 Stel dat A_i normaal verdeeld is met parameters $(\mu_i, \sigma_i^2(t_i))$. Definieer dan de stochastische variabele $X = A_2 - A_1$, die normaal verdeeld is met parameters $(\mu_X = \mu_2 - \mu_1, \sigma_X^2(t_1, t_2) = \sigma_2^2(t_2) + \sigma_1^2(t_1))$. Invullen van (4.10) geeft dan:

$$P(\text{infraconflict}|t) = \Phi\left(\frac{\tau_{12} - \mu_X}{\sigma_X(t_1, t_2)}\right) - \Phi\left(\frac{-\tau_{21} - \mu_X}{\sigma_X(t_1, t_2)}\right).$$

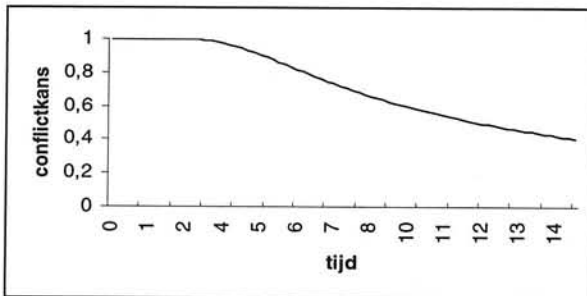
Voorbeeld 5 Stel er is een verkeersregelpunt dat bestaat uit een gelijkvloerse kruising. Twee ritten (rit 1 en rit 2) staan gepland om dit verkeersregelpunt te passeren, om 812 en 814 respectievelijk. De opvolgtijd is één minuut in beide volgordes ($\tau_{12} = \tau_{21} = 1$). Stel dat rit 1 twee minuten vertraagd zegt te zijn en beide ritten een normale verdeling voor hun aankomsttijd opgeven:

$$A_i \sim N(814, (\frac{1}{4}\sqrt{t})^2) \quad i = 1, 2.$$

Verder geldt dat $X = A_2 - A_1$ een normaal $(0, \frac{1}{8}t)$ verdeelde stochastische variabele is. De conflictkans is hier nu:

$$\begin{aligned} P(\text{infraconflict}|t) &= P(-1 \leq X \leq 1) \\ &= \Phi\left(\frac{8}{t}\right) - \Phi\left(\frac{-8}{t}\right) \\ &= 2\Phi\left(\frac{8}{t}\right) - 1 \end{aligned}$$

In figuur 4.5 is deze conflictkans tegen t uitgezet. Voor $t = 5$, de conflictkans is dan gebaseerd op de voorspelling die gedaan is op tijdstip 809, geldt als conflictkans 0.89.



Figuur 4.5: Conflictkans in voorbeeld 5

Twee vertrekkende treinen

Op dezelfde wijze als in de vorige paragraaf kan een uitdrukking bepaald worden voor de situatie van twee vertrekkende treinen:

$$\begin{aligned}
P(\text{infraconflict}|t) &= P(V_1 \leq V_2 \leq V_1 + \tau_{12}|t, V_1 \leq V_2) \\
&\quad + P(V_2 < V_1 \leq V_2 + \tau_{21}|t, V_2 < V_1) \\
&= P(0 \leq V_2 - V_1 \leq \tau_{12}|t, V_1 \leq V_2) \\
&\quad + P(-\tau_{21} \leq V_2 - V_1 < 0|t, V_2 < V_1) \\
&= P(-\tau_{21} \leq V_2 - V_1 \leq \tau_{12}|t)
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Indien twee treinen vertrekken vanuit een verkeersregelpunt over dezelfde vrij baan moet nog met een andere gebeurtenis rekening gehouden worden: een rit wil een andere, langzamere, rit inhalen, terwijl dat niet mogelijk is. De snellere rit wordt daardoor belemmerd in zijn doorgang. De kans op zo'n inhaal conflict is de kans dat de vertrektijd plus rijtijd van deze rit kleiner is dan de vertrektijd plus rijtijd plus opvolgtijd van een andere rit. Definieer daarvoor R als de stochastische variabele voor de rijtijd en τ de opvolgtijd, dan geldt als rit 1 de later vertrekkende, snellere rit is:

$$P(\text{inhaal conflict}|t) = P(V_1 + R_1 < V_2 + R_2 + \tau|t) \tag{4.13}$$

Voorbeeld 6 *Stel dat een snelle rit gepland vertrekt 5 minuten na een langzame. De rijtijd van de snelle rit is normaal verdeeld met parameters $\mu = 10$ en $\sigma^2 = 1$ en die van de langzame rit is ook normaal verdeeld met parameters $\mu = 12$ en $\sigma^2 = 1$. De opvolgtijd bedraagt 2 minuten. Definieer de stochastische variabele $X = R_1 - R_2$, die normaal verdeeld is met parameters $\mu = -2$ en $\sigma^2 = 2$. Voor de conflictkans geldt nu door (4.13) in te vullen:*

$$\begin{aligned}
P(\text{inhaal conflict}) &= P(R_1 - R_2 < v_2 - v_1 + \tau) \\
&= P(X < -3) \\
&= P\left(\frac{X + 2}{\sqrt{2}} < \frac{-3 + 2}{\sqrt{2}}\right) \\
&= 1 - \Phi(0.71) = 0.2420
\end{aligned}$$

Een vertrekkende en een aankomende rit

De situatie bestaat nu uit twee ritten, waarvan er één rit aankomt bij een verkeersregelpunt en één rit vertrekt. De aankomende rit geeft voorspellingen af over zijn aankomsttijd A .

De lengtes van de opvolgtijden zijn vast en worden τ_{av} , als de aankomende trein eerst is, en τ_{va} , in het andere geval, genoemd. De conflictkans kan weer, zoals bij twee aankomende treinen, worden gesplitst in twee delen.

$$P(\text{infraconflict}|t) = P(A \leq V \leq A + \tau_{av}|t, A \leq V) + P(V < A \leq V + \tau_{va}|t, V < A)$$

$$\begin{aligned}
&= P(-V \leq -A \leq -V + \tau_{av}|t, A \leq V) + P(V < A \leq V + \tau_{va}|t, V < A) \\
&= P(V - \tau_{av} \leq A \leq V|t, A \leq V) + P(V < A \leq V + \tau_{va}|t, V < A) \\
&= P(V - \tau_{av} \leq A \leq V + \tau_{va}|t)
\end{aligned} \tag{4.14}$$

Wat nog verder kan worden uitgeschreven als:

$$P(\text{infraconflict}|t) = \int_v^\infty \int_{y-\tau_{av}}^{y+\tau_{va}} f_A(x|t) f_V(y|t) dx dy. \tag{4.15}$$

Toepassing 3 Stel weer dat A normaal verdeeld is met parameters $(\mu, \sigma^2(t))$ en $V = v$ vast. Invullen van (4.15) geeft dan:

$$P(\text{infraconflict}|t) = \Phi\left(\frac{v + \tau_{va} - \mu}{\sigma(t)}\right) - \Phi\left(\frac{v - \tau_{av} - \mu}{\sigma(t)}\right).$$

4.4 Conclusie

Het berekenen van de conflictkansen is bedoeld als conflictsignalering: bepalen wanneer een conflict serieus genoeg is om het verkeersplan voor aan te passen. De conflictsignalering geldt als trigger voor het maken van een nieuw lokaal verkeersplan: het maken van een nieuw lokaal verkeersplan is nodig als een conflictkans van een gesignaleerd conflict een drempelwaarde overschrijdt. De hoogte van de drempelwaarde zal bij implementatie vastgesteld moeten worden en zal sterk afhangen van het soort kansverdelingen dat gebruikt wordt.

In dit rapport wordt ook het omwisselen van de volgorde van twee reeds geplande planevents die niet conflictvrij samengaan, als trigger gezien tot het maken van een nieuw verkeersplan. Als beeld kan hierbij gebruikt worden dat voor elk gepland planevent een maximale schuifruimte wordt gedefinieerd, waarbinnen de planeventtijd kan variëren zonder een conflict te veroorzaken. Als de rit een nieuwe tijd doorgeeft aan het lokale verkeersplan, waardoor de volgorde met een ander planevent wordt omgedraaid, schuift het planevent buiten zijn maximale schuifruimte, dus moet er een nieuw lokaal verkeersplan gemaakt worden.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat, wanneer er geen initieel verkeersplan is en er vooraf geen volgorde gedefinieerd is, een planevent alleen het maken van een nieuw lokaal verkeersplan kan triggeren als er daadwerkelijk sprake is van een conflict met een grote conflictkans. Van wisseling van volgorde is hier immers geen sprake.

Samengevat geldt dat conflictdetectering als volgt wordt uitgevoerd: Er bestaat een verkeersplan (dit kan ook een leeg verkeersplan zijn) bestaande uit planregels die de planevents voorstellen. Een rit meldt zich bij het lokale verkeersplan met een verwachte aankomsttijd. Er zijn twee mogelijkheden:

- Er bestaat reeds een planevent voor die rit in het verkeersplan. Als de verwachte aankomsttijd afwijkt van de planeventtijd wordt gecontroleerd of de nieuwe tijd leidt

tot conflicten waarbij de conflictkans hoger is dan de drempelwaarde. Als dat zo is, of indien er een volgordewisseling met één van de andere planevents heeft plaatsgevonden, dan zal er een nieuw verkeersplan worden gecreëerd.

- Er bestaat nog geen planevent voor die rit in het verkeersplan. Als de nieuwe tijd leidt tot (een) conflict(en) met een conflictkans hoger dan de drempelwaarde, met alle mogelijke conflicterende planevents, dan zal er een nieuw verkeersplan worden gecreëerd.

Hoe het nieuwe verkeersplan vervolgens wordt gecreëerd wordt behandeld in het volgende hoofdstuk.

Hoofdstuk 5

Creëren nieuw verkeersplan

De tweede stap in het ontwerp voor de verkeersleiding, zoals vermeld in paragraaf 3.4.3, is het vinden van een nieuw, conflictvrij verkeersplan, uitgaande van de verstoorde situatie. Er is (minstens) één conflict waarvan de conflictkans boven de drempel uitkomt. Dit conflict heeft de tweede stap getriggerd. In dit en het volgende hoofdstuk zal worden aangegeven hoe wordt gekomen van een verstoorde situatie via een probleeminstantie tot een nieuw verkeersplan.

5.1 Driedeling

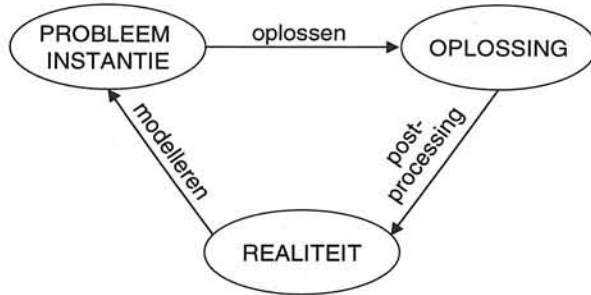
De uitgangspositie is een verkeersplan die de verstoorde situatie weergeeft. Vervolgens zal er een aantal handelingen moeten worden uitgevoerd die resulteert in een nieuw conflictvrij verkeersplan. Dit traject zal bestaan uit drie stappen (zie figuur 5.1):

1. modelleren
2. oplossen
3. post-processing

Het modelleren is het vertalen van de realiteit naar een probleeminstantie voor het wiskundig model. Hierbij zullen aannames gemaakt moeten worden die de oplossingsruimte van het wiskundig model beperken, maar toch zorgen voor een zo goed mogelijke weergave van de werkelijkheid.

Het oplossen zal vervolgens binnen de oplossingsruimte, die door het wiskundig model wordt bepaald, zoeken naar een goede of de optimale oplossing voor de probleeminstantie.

Tenslotte zal door middel van postprocessing de oplossing worden vertaald naar een verkeersplan. Hierbij kan gedacht worden aan het vertalen van een discrete tijdsruimte naar een continue tijdsruimte, wat misschien nog wat ruimte geeft treinen conflictvrij te vervroegen.



Figuur 5.1: Driedeling

In dit hoofdstuk zal de eerste stap, modellering worden behandeld. De mogelijke oplosmethodes en de post-processing volgen in het volgende hoofdstuk.

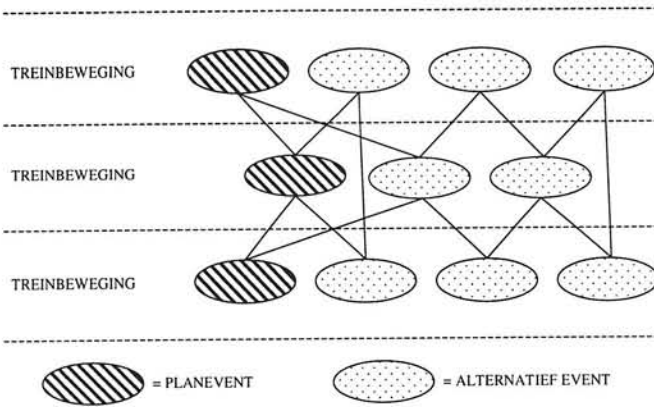
5.2 Modelling als clique-probleem

Voor de planevents, de uitvoering van de treinbewegingen in het huidige verkeersplan, wordt een (eindige) verzameling alternatieven gekozen.¹ Het huidige verkeersplan samen met de alternatieve events worden gerepresenteerd door een ongerichte graaf G . Beschouw deze ongerichte graaf $G = (V, E)$ bestaande uit een verzameling knopen (V) en takken (E), de verbindingen tussen die knopen. Een knoop in deze graaf is een event: een combinatie van een treinbeweging, een tijd en een route. Een tak tussen twee knopen bestaat als de combinatie van die twee knopen toegestaan is, dat wil zeggen dat er geen beperking wordt opgelegd door de infrastructuur, die het uitvoeren van die combinatie van events onmogelijk maakt.

Er wordt hierbij dus onderscheid gemaakt tussen ‘harde’ en ‘zachte’ conflicten. Harde conflicten zijn infraconflicten; er kunnen echt geen twee treinen op hetzelfde ogenblik op hetzelfde stuk spoor rijden. Een combinatie van events die leidt tot een hard conflict heeft geen verbindende tak. Zachte conflicten zijn bijvoorbeeld het verbreken van aansluitingen; dit mag maar heeft kosten tot gevolg. De knopen zijn bij een zacht conflict dus wel verbonden in de graaf. Een verdere mogelijkheid is harde conflicten toch als zacht te beschouwen, wanneer de kans op het harde conflict klein is, bijvoorbeeld doordat het conflict ver in de toekomst ligt.

Een clique in G is een deelverzameling C van V , waarvoor geldt dat de verbinding $v-w$ een element is van E voor elk tweetal punten v, w uit C . Een clique is dus, met andere

¹de manier waarop wordt beschreven in paragraaf 5.3.



Figuur 5.2: Opbouw van de graaf

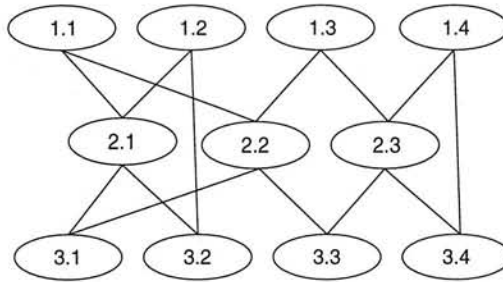
woorden, een volledige subgraaf van G . Het vinden van een maximale clique, een clique bestaande uit zoveel mogelijk knopen, is een NP-compleet probleem (zie paragraaf 6.2).

Het vinden van een uitvoerbaar verkeersplan is nu net het vinden van een maximale clique. Bijzonder bij dit probleem, als er geen deadlock optreedt, is dat dit altijd een clique zal zijn met als cardinaliteit het aantal treinbewegingen. Wanneer namelijk m het aantal treinbewegingen voorstelt en n het aantal alternatieven per treinbeweging, bestaat de graaf uit m lagen van n knopen: één laag per treinbeweging, bestaande uit zijn planevent en de alternatieven hiervoor, zoals weergegeven in figuur 5.2. Deze n knopen per laag zijn onderling niet verbonden. In een clique zal uit elk van de m lagen één knoop gekozen worden.

Voorbeeld 7 Een voorbeeld is te vinden in figuur 5.3. Hierin representeert een graaf een situatie met 3 treinbewegingen. Het oorspronkelijke plan (de planevents) wordt gevonden in de knopen (1.1), (2.1) en (3.1). De knopen (1.1) en (3.1) kunnen echter niet tegelijkertijd plaatsvinden (ze zijn niet verbonden). Daarom zijn voor treinbeweging 1 drie extra alternatieven meegenomen, voor treinbeweging 2 twee en voor treinbeweging 3 weer drie. Deze alternatieve events verschillen van de planevent in tijd, route of perron. In deze graaf zijn twee uitvoerbare plannen (cliques) te vinden:

- (1.2) (2.1) (3.2)
- (1.4) (2.3) (3.4)

Een probleem bij deze modellering is dat de haltering van een trein bij een bepaald perron, de haltering van een andere trein bij dat perron kan omvatten. Stel bijvoorbeeld dat trein



Figuur 5.3: Clique in voorbeeld 7

A tussen 8.00 en 8.08 kan aankomen en tussen 8.02 en 8.10 kan vertrekken. Dit geeft dat, naast vele andere combinaties, de volgende twee halteringsmogelijkheden voor trein *A* te maken zijn in de graaf:

1. 8.00 aankomst en 8.02 vertrek,
2. 8.08 aankomst en 8.10 vertrek.

Stel verder dat Trein *B* tussen 8.04 en 8.10 kan aankomen en tussen 8.06 en 8.12 kan vertrekken. In de modellering zoals hierboven uitgelegd is het ook mogelijk knopen zo te kiezen dat trein *A* halteert van 8.00 tot 8.10 en trein *B* van 8.04 tot 8.06. In de praktijk is dit echter onmogelijk, je hebt hierbij namelijk een hard conflict. Er zijn drie mogelijkheden te geven om dit probleem te omzeilen:

1. vaste halteringstijd.
2. toevoegen van een knoop voor elke tweetal aankomst/vertrekknopen.
3. per perronspoor van tevoren via een prioriteitsregel de volgorde bepalen.

Omdat de eerste mogelijkheid zeer grote beperkingen geeft en de tweede mogelijkheid zeer veel extra knopen en takken oplevert, zal de derde optie te prefereren zijn. Hierbij kan, bij kleine verstoringen, gedacht worden de volgorde te handhaven waarin de treinen arriveren.

5.3 Opbouwen graaf

In de vorige paragraaf is uitgelegd hoe de planevents van de treinbewegingen in het verkeersplan met de alternatieven voor deze treinbewegingen kunnen worden weergegeven als een ongerichte graaf. De vraag hier is uit welke knopen de graaf moet bestaan, oftewel welke alternatieven moeten worden meegenomen voor de treinbewegingen in het huidige verkeersplan. In deze paragraaf zullen enkele ideeën hiervoor worden gegeven.

5.3.1 Beschouwing

Een probleem bij het opbouwen van de graaf is het grote aantal knopen en takken dat kan ontstaan. Stel dat er m treinbewegingen zijn, die elk n alternatieven hebben dan geeft dat $m * n$ knopen en $\frac{1}{2}(m * n)(m * n - 1)$ takken met gewichten. Zo geeft een probleem met 30 treinbewegingen, elke treinbeweging 2 mogelijke routes en 10 mogelijke tijdstippen, $m = 30$ en $n = 20$, 600 knopen en 179700 takken. (Voorbeeld: Utrecht CS heeft zo'n 150 treinbewegingen per uur (in de spits), Hilversum 30). Het opbouwen van een graaf van deze omvang kost tijd en veel geheugenruimte. Het aantal treinbewegingen dat wordt meegenomen (de planhorizon) zal sterk bepaald worden door de beschikbare rekentijd. Hierbij zal erop gelet moeten worden dat gekozen alternatieven binnen de planhorizon niet conflicteren (of geen grote conflictkans hebben) met planevents buiten de planhorizon. Dit kan simpel worden bereikt door de treinbewegingen buiten de planhorizon wel mee te nemen in de graaf, maar dan zonder alternatieven. Verder geldt dat een toegevoegd alternatief moet zijn verbonden met minstens één alternatief van alle andere treinbewegingen, omdat anders al direct duidelijk is dat dit alternatief nooit in het uiteindelijke verkeersplan kan voorkomen. Aangezien de tijd een belangrijke rol speelt, lijkt het voor de hand te liggen het snel vinden van een (goede) oplossing te prefereren boven het vinden van de maximale oplossing.

5.3.2 Procedure

De eerste knopen waaruit de graaf bestaat is de huidige situatie van het verkeersplan, de planevents. Niet voor alle treinbewegingen hoeven alternatieven te worden meegenomen. De treinbewegingen waarvoor alternatieven in de graaf opgenomen worden zijn:

- treinbewegingen met conflicterende planevents.
- treinbewegingen met een aansluiting met treinbewegingen van het eerste punt.
- treinbewegingen met planevents waarvan de rijweg 'dicht bij' die van de eerste twee punten.

Om de zoekruimte te vergroten wordt voor elk te plannen treinbeweging een aantal alternatieve events (=knopen) toegevoegd, die slechts verschillen in het tijdstip. Vervolgens wordt aan de conflicterende treinbewegingen alternatieven toegevoegd, die conflictafhankelijk zijn. Neem hiervoor de conflicten en de oplossingen die hiervoor genoemd zijn in paragraaf 1.4. Hier wordt echter rekening gehouden met een eenvoudigere verzameling conflictoplossingen.

Voor de conflicterende treinbewegingen met een rijweg of perronconflict worden alternatieven met een ander perron en/of rijweg toegevoegd. Indien een alternatief perronspoor aan een treinbeweging wordt toegestaan, moet dit alternatief ook worden toegevoegd aan de treinbeweging die materieelaansluiting hiermee heeft. Een doorgaande rit wordt immers beschreven door twee planevents met een materieelaansluiting. Ook aan treinbewegingen met een route 'dicht bij' conflicterende treinbewegingen worden extra routes toegevoegd.

De lay-out van de infrastructuur zal uitmaken wat 'dicht bij' betekent, maar gedacht kan worden aan routes die conflicteren met alternatieve routes van conflicterende treinbewegingen, of aan routes die het uitrijspoor gemeenschappelijk hebben.

Voor zachte conflicten kan gekozen worden extra personeel en/of materieel in te zetten of reizigersaansluitingen te verbreken. Dit wordt volledig bepaald door de kostenstructuur en alternatieven in tijden. Hiervoor hoeven dus geen extra nieuwe knopen te worden toegevoegd.

5.3.3 Alternatieven in tijd

De eerste vraag die hierbij komt kijken is hoe groot de stapjes in de tijd tussen de alternatieven moeten worden genomen. Naar mate de stappen kleiner worden genomen wordt de zoekruimte groter, dus de mogelijkheden voor het vinden van een oplossing groter, maar het probleem groter en dus complexer. Het spoorboekje wordt gegeven in minuten en het vrijgeven van rijwegen in de praktijk gaat in minuten, terwijl in andere onderzoeken een tiende minuut (=6 seconden) wordt genomen. In hoeverre is het zinvol tijdstippen van 6 seconden te nemen als de onzekerheid groot is? Het is dan weer snel een bron voor nieuwe conflicten. Aangezien in de praktijk veel tijden geheeltallig zijn, ligt het voor de hand te kijken voor stappen van een halve of hele minuut.

Vervolgens moet worden bekeken welke tijdstippen worden meegenomen. Een optie hiervoor is dat de tijdstippen van de alternatieven die worden toegevoegd altijd later zijn dan de tijd van de planevent in het huidige verkeersplan voor de betreffende rit. Echter, het is mogelijk dat handig is dat een treinbeweging eerder plaatsvindt dan nu gepland staat, mits dat volgens de trein mogelijk is. Er kan dus ook aan gedacht worden als eerste tijdstip de vroegst mogelijke tijd² als vroegste tijdstip in de graaf te gebruiken. Een voorbeeld van een situatie waar dit laatste handig is, is te vinden in voorbeeld 8. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de behoefte terug te komen op een eerder genomen beslissing duidt op het te vroeg nemen van een beslissing. Dit kan worden geregeld door de drempelwaarde voor de conflictkans anders in te stellen of door harde conflicten waarvan de kans van optreden klein is bij het zoeken naar een nieuw verkeersplan als een zacht conflict te beschouwen.

Voorbeeld 8 *Stel dat 2 ritten (A en B) een gelijkvloerse kruising (met opvolgtijd 1 minuut) naderen en dezelfde aankomsttijd (bijvoorbeeld 812) voorstellen. Op het moment dat de kans op een conflict groot genoeg is dient een volgorde te worden bepaald, bijvoorbeeld A om 812, B om 813. Als vervolgens rit A meldt toch een minuut later te komen geeft een graaf waarin de plantijd niet vervroegd kan worden de oplossing A om 814, B om 813. Wel vervroegen geeft de (waarschijnlijk) betere oplossing A om 813, B om 812.*

²bijvoorbeeld de voorspelde aankomsttijd van de rit

5.3.4 Alternatieven in rijweg/perron

Elke planevent heeft een beginspoor en een eindspoor. Eén hiervan staat vast, namelijk het spoor aan de rand van het verkeersregelpunt. Als de treinbeweging van dat planevent een aankomst is, dan heeft het een voorkeerperronspoor en één of twee alternatieve peronsporen. Per combinatie inrijspoor/perronspoor (of perronspoor/uitrijspoor) kunnen nu alternatieve rijwegen bepaald worden door

- een aantal goede te kiezen uit een beperkte verzameling of uit de gehele verzameling, in directe samenhang met de huidige stand van zaken in het verkeersregelpunt.
- een vooraf bepaalde verzameling alternatieven.

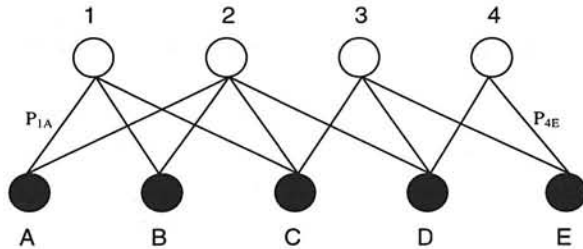
Deze rijwegen kunnen worden gegenereerd door *DONS/Stations*. Merk op dat er voor grotere verkeersregelpunten zeer veel rijwegen kunnen zijn.

5.4 Kostenstructuur en Gewogen clique

Het vinden van een zo goed mogelijk verkeersplan kan pas als er sprake is van een gewogen graaf. In dit probleem zal sprake moeten zijn van zowel gewichten op de knopen als op de takken. Het probleem wordt nu het vinden van een maximale gewogen clique. Er geldt hierbij dat een maximaal gewogen clique niet altijd als cardinaliteit het aantal treinbewegingen hoeft te hebben, zoals geldt bij een maximale clique. Het kan namelijk voorkomen dat een clique bestaande uit $m - 1$ knopen een hogere waarde op knopen en takken heeft dan de beste clique van m knopen. Als er echter in het vervolg wordt gesproken over een maximaal gewogen clique zal hiermee een clique bestaande uit m (het aantal treinbewegingen) knopen worden bedoeld.

Voor het begrip van de gewichten zal in deze paragraaf worden gesproken over kosten, terwijl er voor het creëren van de maximale gewogen clique sprake zal moeten zijn van (positieve) opbrengsten. Hierbij zullen de gewichten van toegestane knopen en takken positief moeten zijn, om een maximale clique te kunnen vinden. Deze omrekening kan bij de berekening eenvoudig plaatsvinden.

De kosten op de knopen (planevents en alternatieven hiervoor) en takken (combinaties van knopen) worden bepaald door conflicten die ze tot gevolg hebben. De conflicten die hierbij worden beschouwd zijn die zoals vermeld in paragraaf 4.2. De knopen kunnen worden opgedeeld in knopen die betrekking hebben op aankomende treinbewegingen en knopen die betrekking hebben op vertrekkende treinbewegingen. In de volgende paragrafen zal worden aangegeven hoe de gewichten kunnen worden bepaald, gelardeerd met voorbeelden.



Figuur 5.4: Relatie aankomst- en vertrektijdstoppen

5.4.1 Knoopp gewichten

Vertrekkende ritten

De gewichten op de knopen zijn de kosten van de acties die door de knopen worden voorgesteld. Deze zullen voor knopen die betrekking hebben op vertrekkende treinbewegingen geheel worden bepaald door de eerste verkeersregelpunten van bestemming waar sprake is van verkeersregeling.

Stel dat de graaf gemaakt wordt voor verkeersregelpunt VRP1 en dat er uitgaande treinbewegingen zijn die als bestemming verkeersregelpunt VRP2 hebben. Elk vertrektijdstop bij VRP1 van elk van de treinbeweging kan worden gerelateerd aan een verzameling aankomsttijdstoppen bij VRP2 door middel van kansen. Stel bijvoorbeeld dat er 4 vertrekmomenten (1,2,3,4) zijn die gerelateerd kunnen worden aan vijf aankomsttijdstoppen (A t/m E) dan is p_{1A} de kans dat een rit die vertrekt op tijdstip 1 bij VRP1 aankomt op tijdstip A bij VRP2 (zie figuur 5.4). Aan de aankomsttijdstoppen worden nu kosten $c(j)$, met $j \in \{A, \dots, E\}$, toegekend door VRP2, gegeven de huidige stand van zaken in zijn verkeersplan, als zijnde zeker dat de rit op dat moment aankomt. De precieze uitwerking hiervan staat in de volgende alinea. De kosten van de vertrekmomenten kunnen dan simpel bepaald worden:

$$c(i) = \sum_{j \in \{A, \dots, E\}} c(j)p_{ij} \quad i = 1, \dots, 4. \quad (5.1)$$

De kosten kunnen eventueel nog verhoogd worden met een boetefactor die afwijking van het oorspronkelijke plan bestraft. Hiermee kunnen strategieën benaderd worden waarin het vertragen van een reeds vertraagde rit met y minuten minder zwaar wordt bestraft dan het vertragen van een nog onvertraagde rit met y minuten. Het omgekeerde is natuurlijk ook mogelijk, wanneer het streven is de vertraagde rit zo snel mogelijk weer op het oorspronkelijke schema te krijgen. Stel bijvoorbeeld dat i^* het oorspronkelijke planevent was³. Hiervoor kan een boete functie $f(i^*, i)$ gemaakt worden, voor het uitvoeren van event i in plaats van i^* , waarmee $c(i)$ verhoogd wordt: $c(i) = c(i) + f(i^*, i)$.

³bijvoorbeeld zoals gepubliceerd in het spoorboekje

Voor het berekenen van de kosten $c(j)$ bepaalt VRP2 de gevolgen de aankomende treinbeweging behorende bij rit θ op tijdstip j , gegeven de huidige situatie in zijn lokale verkeersplan. De events van deze treinbeweging worden gekarakteriseerd door het paar (θ, j) , de route wordt hierbij vast genomen. Het beoordelen van de verschillende aankomsttijdstippen zal dus niet het sein zijn voor optimalisering van het eigen gebied. Voor een bepaalde rit θ en tijdstip, definieer:

V_A	verzameling planevents waarvan de rit een aansluitrelatie heeft met θ
V_P	verzameling planevents die op hetzelfde perronspoor halteren als θ
V_R	verzameling planevents waarmee event (θ, j) een rijwegconflict kan hebben
$p_A(\theta, t)$	kans dat tussen (θ, j) en t een aansluitingconflict optreedt, $t \in V_A$
$p_P(\theta, t)$	kans dat tussen (θ, j) en t een perronspoorconflict optreedt, $t \in V_P$
$p_R(\theta, t)$	kans dat tussen (θ, j) en t een rijwegconflict optreedt, $t \in V_R$
$B_A(\theta, t)$	boete voor verbreken aansluiting tussen de θ en de rit van t
$B_P(\theta, t)$	boete voor perronspoorconflict tussen event (θ, j) en planevent t
$B_R(\theta, t)$	boete voor rijwegconflict tussen event (θ, j) en planevent t

Voor de boetes geldt dat deze afhankelijk zijn van de soort ritten en het soort conflict. De boete voor het verbreken van een aansluiting is afhankelijk van bijvoorbeeld de hoeveelheid beschikbaar materieel (bij een materieelaansluiting), hoeveelheid beschikbaar personeel (bij een personeelaansluiting) en hoeveelheid overstappers (bij een reizigersaansluiting).

De conflictkansen kunnen verlaagd worden indien 'conflictvrij schuiven' mogelijk is, waarbij eventuele vrije ruimte in het verkeersplan wordt meegenomen in het wegen van de alternatieven. Neem hiervoor de verzameling T van alternatieve events voor een bepaalde planevent t , die iets afwijken in tijd. Een $t' \in T$ is nu dezelfde treinbeweging als t , met een andere vertrek- of aankomsttijd. Voor een $t' \in T$ geldt nu

$$B_A(\theta, t') = B_A(\theta, t) + \frac{f(t', t)}{p_A(\theta, t')},$$

met $f(\cdot)$ zoals eerder in deze paragraaf. Voor de weging van dit conflict wordt het minimum bepaald:

$$t^* = \arg \min_{t' \in T} B_A(\theta, t') p_A(\theta, t'). \quad (5.2)$$

Deze t^* komt in de plaats van t in de verzameling V_A . Uit de kostenfunctie $B_A(\theta, t')$ kan nu tevens een voorwaarde gedestilleerd worden, wanneer het schuiven overwogen moet worden. Er dient dan, in het geval van een aansluitingconflict, een alternatief beschikbaar te zijn waarvoor geldt:

$$B_A(\theta, t) p_A(\theta, t) > B_A(\theta, t) p_A(\theta, t') + f(t', t),$$

wat equivalent is met

$$f(t', t) < B_A(\theta, t) (p_A(\theta, t) - p_A(\theta, t')),$$

aangezien de verwachte kosten na de verschuiving lager moet zijn dan in de oorspronkelijke situatie.

De kosten voor rit θ en aankomstmoment j wordt nu

$$c(j) = \sum_{t \in V_A} p_A(\theta, t) B_A(\theta, t) + \sum_{t \in V_P} p_P(\theta, t) B_P(\theta, t) + \sum_{t \in V_R} p_R(\theta, t) B_R(\theta, t) + f(j^*, j) \quad (5.3)$$

Tenslotte zal VRP2 de aankomsten van de verschillende ritten uit VRP1 als combinatie waarderen. Hierop wordt teruggekomen bij het behandelen van de takgewichten.

Aankomende ritten

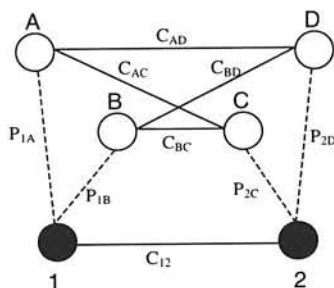
Bij aankomende treinbewegingen zal door de gewichten op de knopen een waarde worden gegeven aan de combinatie inrij, perron (of doorrij) en uitrijspoor; afwijken van de standaard detailroute en perronspoor zal immers worden bestraft. Verder kunnen er hiermee prioriteiten gesteld worden als een volgorde moet worden bepaald bij rijwegconflicten. Dit is de enige punctualiteit die aan die kant kan worden afgedwongen, de aankomsttijd bij de rand van het verkeersregelpunt valt tenslotte niet actief te regelen, dat is een gevolg van de beslissingen in het vorige verkeersregelpunt (die licht beïnvloed kunnen worden) en van onzekere factoren.

5.4.2 Takgewichten

De gewichten op de takken worden bepaald door de lokale verkeersregelaar zelf, met behulp van de gewichten op de knopen en, voor combinaties van vertrekkende treinen (*ceteris paribus*), door de lokale verkeersregelaar van het verkeersregelpunt van bestemming. De gewichten op de takken zijn de opbrengsten van de gezamenlijke acties van de betreffende knopen. Zo levert een combinatie van treinbewegingen waarbij een aansluiting wordt gemist kosten op de betreffende tak op. Een andere oorzaak van takkosten is wanneer een stoptrein net voor een sneltrein vertrekt, in dezelfde richting.

Bij het waarderen van de vertrektijdstoppen is al opgemerkt dat de lokale verkeersregelaar van het naburige verkeersregelpunt combinaties van aankomende treinen uit dezelfde richting onderling waardeert. Deze waarde wordt, na omrekening naar de vertrektijdstoppen, bij de takwaarde opgeteld.

In het vervolg van deze paragraaf wordt met enkele voorbeelden de werkwijze bij het toekennen van kosten aan takken aangegeven.

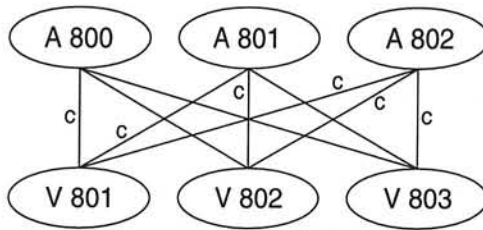


Figuur 5.5: Takgewichten bij twee aankomende treinen

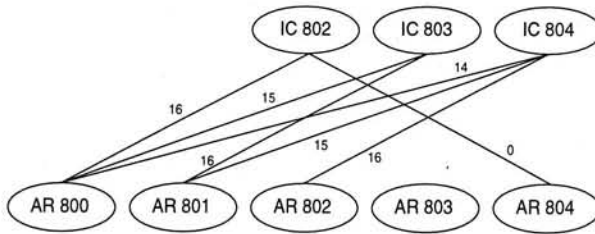
Voorbeeld 9 In figuur 5.5 staat een voorbeeld van het waarderen van combinaties van twee vertrekkende ritten die naar hetzelfde verkeersregelpunt gaan. De knopen 1 en 2 zijn hierin vertrekmomenten bij VRP1 van twee verschillende ritten $T1$ en $T2$. Vertrekmoment 1 van rit $T1$ heeft twee mogelijke aankomstmomenten bij VRP2, met kansen p_{1A} en p_{1B} zoals in de vorige paragraaf besproken. VRP2 geeft nu gewichten aan de combinaties AC , AD , BC en BD . Het (extra) gewicht op de tak $1 - 2$ wordt nu:

$$c(1, 2) = p_{1A}p_{2C}C_{AC} + p_{1A}p_{2D}C_{AD} + p_{1B}p_{2C}C_{BC} + p_{1B}p_{2D}C_{BD}.$$

Voorbeeld 10 Een eenvoudig voorbeeld van het gewicht op de takken is wanneer een vertrekkende rit een reizigersaansluiting heeft met een aankomende trein. De aansluiting wordt behouden als de reizigers tenminste 2 minuten overstaptijd hebben. In figuur 5.6 zijn er voor beide treinbewegingen drie knopen en worden alleen de kosten, veroorzaakt door het missen van de aansluiting, vermeld. Een aankomst om 800 gecombineerd met een vertrek om 802 is geen probleem, terwijl een vertrek om 801 extra kosten c oplevert op de tak die de twee knopen verbindt.



Figuur 5.6: Takgewichten bij aansluiting in voorbeeld 10



Figuur 5.7: Takgewichten in voorbeeld 11

Voorbeeld 11 Als voorbeeld van het waarderen van de takken, beschouw het volgende eenvoudige probleem. Stel twee treinen, een intercity en een stoptrein willen richting hetzelfde verkeersregelpunt. De stoptrein heeft onderweg nog een haltering, waar geen ruimte is voor inhalen, waardoor de stoptrein 6 minuten langer onderweg is dan de intercity (16 en 10 minuten respectievelijk). De rijtijd wordt voor het gemak vast genomen, dus, bijvoorbeeld, $p_{802,812} = 1$ voor de intercity. De stoptrein kan al op tijdstip 800 vertrekken, de intercity is pas op 802 klaar voor vertrek. Het huidige verkeersregelpunt vraagt nu aan het naburige verkeersregelpunt de mogelijke aankomsttijdstippen van de twee treinen te beoordelen. De aankomsttijdstippen hebben in dit voorbeeld een 1 – 1 relatie met de vertrektijdstippen. Volgens de huidige stand van zaken moet de intercity uiterlijk 814 binnenkomen om een aansluiting te halen. Verdere conflictvrije verschuiving is hierbij niet mogelijk. Als nu de kosten worden uitgedrukt in minuten vertraging, het missen van de aansluiting wordt bestraft met 10 minuten en er geen wegingsfactoren voor de verschillende treinsorten worden meegenomen, dan komt de kostenstructuur tot stand zoals weergegeven in tabel 5.1.

Echter, als de stoptrein om 800 vertrekt en de intercity om 802, zal de intercity, rekening houdend met opvolgtijden (2 minuten in dit voorbeeld) pas om 818 aankomen, in plaats van het verwachte tijdstip 812. Dit staat gelijk aan een vertrek van de intercity om 808. Dit verschil van kosten zal op de takken moeten worden gelegd. De tak (stoptrein,800)-(intercity,802) zal dus als kosten 16 hebben. De tak (intercity,802)-(stoptrein,804) zal geen kosten hebben, en de tak (intercity,802)-(stoptrein,802) zal niet bestaan. In de figuur 5.7 zijn voor een deel van het probleem de knopen en takken weergegeven, met de takgewichten.

Merk op dat in dit voorbeeld geen rekening hoeft te worden gehouden met de veranderende kansen voor de relatie tussen de vertrek- en aankomsttijdstippen, indien de intercity achter de stoptrein zit. Door de 1 – 1 relatie tussen aankomst en vertrektijd kan immers worden aangenomen dat wanneer de intercity vertrekt om 802 achter de stoptrein aan, dit kan worden vergeleken met een vertrek om 808. Wanneer die 1 – 1 relatie er niet is zal de spreiding in de aankomsttijd in het geval dat de intercity achter de stoptrein zit echter anders zijn dan de spreiding in het geval de volgorde is omgedraaid. Dit zal echter verwaarloosd worden in het vervolg van dit rapport.

	800	801	802	803	804	805	806	807	808
intercity			0	1	2	13	14	15	16
stoptrein	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Tabel 5.1: voorbeeld knooppkosten

5.4.3 Volgende verkeersregelpunten

Indien er bij het naburige verkeersregelpunt niet de gelegenheid is in te halen of wanneer een verkeersregelpunt voorbij de naburige verkeersregelpunten belangrijk⁴ is, kunnen extra tak- en knoopwaarden worden berekend op dezelfde manier zoals in de vorige paragrafen. Een probleem hierbij is de onzekerheid van de beslissing in de tussenliggende verkeersregelpunten. Stel weer dat er een nieuw verkeersplan gemaakt dient te worden voor VRP1, en dat de rit vervolgens via VRP2 naar VRP3 rijdt. De aankomsttijden in VRP3 hangen af van de beslissingen genomen in VRP2, die onzeker zijn maar wel de tijd bepalen die een rit nodig heeft VRP2 te passeren.

Definieer hiervoor de dichtheidsgraad $\rho(\text{VRP2}, T)$ als een maat voor de drukte in VRP2 rond tijdstip T , en de stochastische variabele X als de tijd die een rit nodig heeft VRP2 te passeren. De functie $P_D(X = x | \theta, \rho(\text{VRP2}, T))$ geeft nu de kans dat rit θ x tijdseenheden nodig heeft om rond tijdstip T VRP2 te passeren. Op dezelfde manier zoals weergegeven

⁴belangrijk kan hier betekenen dat beslissingen in dit verkeersregelpunt een grote invloed hebben op de treinenloop in de omgeving

in figuur 5.4, is het nu mogelijk een relatie te geven tussen de vertrekmomenten in VRP1 en de aankomstmomenten in VRP3.

Vervolgens moeten deze kosten nog opgenomen worden in de kostenstructuur $c(i)$. Stel dat vertrekmoment i gerelateerd kan worden aan aankomstmomenten A t/m E bij VRP2, zoals in paragraaf 5.4.1, en aan F t/m I in VRP3. De kosten van de vertrekmomenten worden dan bepaald door:

$$c(i) = g_{\text{VRP2}} \sum_{j \in \{A, \dots, E\}} c(j) p_{ij} + g_{\text{VRP3}} \sum_{k \in \{F, \dots, I\}} c(k) p_{ik}. \quad (5.4)$$

in plaats van (5.1). De waardes g_{VRP2} en g_{VRP3} zijn hierbij gewichten, toegekend door VRP1. Dit gewicht kan bijvoorbeeld groter worden wanneer het bijbehorende verkeersregelpunt belangrijker is, of wanneer een bezoek aan dit verkeersregelpunt verder in de tijd ligt. Wanneer op deze manier alle verkeersregelpunten die op de route van een vertrekkende rit liggen worden meegenomen, geeft een goede invulling van de gewichten zelf aan hoeveel verkeersregelpunten moeten worden meegenomen.

Een punt van aandacht hierbij is de schaling van de gewichten. Indien de gewichten optellen tot een waarde groter dan één, wordt aan deze rit een hogere prioriteit toegekend dan aan een andere rit die nog maar één vervolgstation heeft. Hier is natuurlijk wat voor te zeggen.

Als samenvatting wordt een overzicht gegeven hoe de conflicten in het huidige en volgende verkeersregelpunt worden meegenomen in de waardering van de knopen en takken in de tabellen 5.2 en 5.3.

5.4.4 Maximaal gewogen clique

Voor de graaf $G = (V, E)$ zijn alle knoopwaarden $c(i) \forall i \in V$ en alle takwaarden $c(ij) \forall ij \in E$ gedefinieerd. In het vervolg worden deze takgewichten echter beschouwd als opbrengsten en kan er gezocht worden naar een maximale gewogen clique. Deze omrekening kan eenvoudig plaatsvinden, bijvoorbeeld door de herdefiniëring:

$$\begin{aligned} \tilde{c}(i) &= (\max_{j \in V} c(j)) - c(i) + \text{constante} \\ \tilde{c}(ij) &= (\max_{kl \in E} c(kl)) - c(ij) + \text{constante} \end{aligned}$$

Het optellen van een (positieve) constante zorgt er voor dat alle gewichten strikt groter dan nul zijn, nodig voor het vinden van een maximaal gewogen clique. In het vervolg wordt met $c(\cdot)$ de opbrengst $\tilde{c}(\cdot)$ bedoeld. De waarde van een clique C wordt genoteerd als $w(C)$ en het probleem wordt:

$$\max_C w(C) = \max_C \sum_{i \in V(C)} c(i) + \sum_{ij \in E(C)} c(ij) \quad (5.5)$$

waarbij $V(C)$ de verzameling knopen van de clique is en $E(C)$ de verzameling takken van de clique.

Conflict \ plaats	huidige verkeersregelpunt	volgend verkeersregelpunt
Conflicterende rijwegen	ontbrekende tak	kosten op vertrekknop
Bezet perronspoor	volgorde wordt van tevoren vastgelegd	kosten op vertrekknop dat dit veroorzaakt
Trein past niet langs perron	perronspoor wordt niet als optie gebruikt	niet van toepassing
Verbroken reizigers-aansluiting	kosten op tak tussen combinaties van vertrek en aankomstknopen die dat veroorzaken	kosten op vertrekknop dat dit veroorzaakt
Verbroken materieel-aansluiting	kosten op tak tussen combinaties van vertrek en aankomstknopen die dat veroorzaken, afhankelijk van hoeveelheid reservematerieel	kosten op vertrekknop dat dit veroorzaakt afhankelijk van hoeveelheid reservematerieel
Te korte halteringstijd	kosten op tak tussen combinaties van vertrek en aankomstknopen die dat veroorzaken	kosten op vertrekknop die dat veroorzaakt
Kleine vertraging	kosten op de betreffende knop	kosten op de betreffende vertrekknop

Tabel 5.2: handelswijze voor conflicten in verkeersregelpunten

Conflict \ plaats	globale bereikbaarheid voor huidige verkeersregelpunt	globale bereikbaarheid na huidige verkeersregelpunt
Conflicterende rijwegen	accepteren en controleren op consistentie voorspellingen.	kosten op tak tussen combinaties van vertrek- en aankomstknopen die dit veroorzaken.

Tabel 5.3: handelswijze voor conflicten op globale bereikbaarheden

5.5 Kwaliteit oplossing

Omdat er bij de oplosmethode sprake is van een poging tot optimaliseren zullen voldoende alternatieven voorhanden moeten zijn. Het toevoegen van slechts zoveel knopen dat een oplossing wordt gevonden geeft wel een oplossing, maar geen idee van de waarde ervan. Om een goede oplossing te garanderen moet voorkomen worden dat er winst is te halen uit de sprongen in de kostenfuncties, waarbij het toevoegen van één alternatief in de tijd net een aansluiting had kunnen realiseren, waardoor de kosten met een sprong omlaag gaan, ondanks de kosten voor het extra wachten.

Voorbeeld 12 *Stel dat trein A een aansluiting heeft met trein B. Trein A komt, te laat, binnen om 805. Trein B staat oorspronkelijk gepland om 802 en een overstap wordt gehandhaafd als er minimaal twee minuten overstaptijd is. De kosten van het niet handhaven van een aansluiting zijn 20 eenheden, en de kosten het vertragen van trein B zijn 2 eenheden per minuut. Stel dat in de graaf trein B vijf tijdsalternatieven heeft met stapgrootte één minuut. De overstap kan in deze graaf niet gehandhaafd worden. Trein A zal aankomen om 805 en trein B zal vertrekken om 802. De kosten bedragen 20 eenheden. Indien er nu voor trein B één knoop wordt toegevoegd kan de aansluiting gehandhaafd worden: trein A komt aan om 805, trein B vertrekt om 807. Kosten van deze oplossing zijn 10. Een kostenreductie van 10 eenheden. Deze sprong had kunnen worden voorkomen door 10 alternatieven ($=20/2$) te geven aan trein B.*

Indien voldaan is aan bovenstaande eis die sprongen in de kostenfunctie tegengaat en indien het toewijzen van een alternatief perron erg 'duur' is, dan is het aannemelijk dat er, indien er een oplossing wordt gevonden in de huidige graaf, er geen oplossing kan worden gevonden die veel beter is, door slechts enkele knopen toe te voegen. In het vervolg zal gesproken worden van 'voldoende alternatieven' wanneer voldaan is aan bovenstaande eis.

5.6 Detecteringprobleem

Bij de definitie van conflict bij de conflictdetectering in 4.2 is ervoor gekozen pas iets als een conflict te zien als er bij de uitvoering van de planregels zoals die op dat moment bestaan er inderdaad een probleem optreedt. Vervolgens wordt met de kans op dat conflict bepaald wanneer het serieus wordt genomen. Er kan echter ook voor gekozen worden een situatie als een conflict te beschouwen als de conflictkans een drempel overschrijdt. Een kleine kans op een conflictsituatie wordt dan niet als een conflict gezien. De definitie is dan echter anders dan bij het maken van het nieuwe verkeersplan. Dit kan leiden tot vier situaties, beschreven in tabel 5.4. Situaties I en IV zijn geen probleem, omdat de beide definities leiden tot dezelfde conclusie. Ook III is geen probleem, omdat dit kan worden

opgevangen door het vervangen van het harde conflict door een zacht conflict in de revisie. Bij II echter kan het voorkomen dat bij een revisie er geen conflict wordt aangetroffen, terwijl er wel een revisieronde getriggerd is. Dit kan leiden tot een oneindig vaak triggeren van een revisieronde, wat zeer ongewenst is.

planning \ detectie	geen conflict	wel conflict
geen conflict	I	II
wel conflict	III	IV

Tabel 5.4: Soorten detectering

Hoofdstuk 6

Overzicht oplosmethoden

Er is in het vorige hoofdstuk een clique-probleem gedefinieerd. In dit hoofdstuk wordt allereerst gekeken naar de complexiteit van dit probleem. Voorts wordt er gekeken welke methoden voor het vinden van een (maximale) clique succesvol kunnen zijn. Een aantal van deze methoden hebben een iets andere wiskundige formulering nodig, namelijk die van een 0-1 kwadratisch programmerings probleem.

6.1 Kwadratisch programmeringsprobleem

Er dient een verkeersplan te worden gemaakt voor m treinbewegingen in het verkeersregelpunt. Er geldt dat er n_i alternatieven zijn voor beweging i . Het clique-probleem kan worden geformuleerd als een 0-1 kwadratisch programmeringsprobleem. Definieer hiervoor de clique-indicator matrix x , waarvoor geldt dat $x_i = 1$ als knoop i in de clique zit en $x_i = 0$ anders. De waardematrix W wordt opgebouwd met de knoopwaarden ($c(i)$) en takwaarden ($c(ij)$) zoals deze zijn berekend in het vorige hoofdstuk. Aangezien exact bekend is uit hoeveel knopen de clique zal moeten bestaan (m), kunnen de knoopgewichten over de takken verdeeld worden. Er geldt:

$$w_{ij} = c(ij) + \frac{c(i) + c(j)}{m - 1}. \quad (6.1)$$

Voor de takken die in het clique-probleem ontbreken, kan in W een (grote) negatieve waarde genomen worden. Het 0-1 kwadratisch programmeringsprobleem wordt dan geformuleerd door

$$\max \frac{1}{2} x^T W x \quad (6.2)$$

Hieraan kunnen voorwaarden gekoppeld worden die eisen dat voor alle treinbewegingen één knoop gekozen wordt.

$$\sum_{i \in \mathcal{A}_k} x_i = 1, \quad k = 1, \dots, m \quad (6.3)$$

waarbij \mathcal{A}_k de verzameling alternatieven voor treinbeweging k is. In plaats hiervan kunnen eisen aan de matrix W worden gesteld, die garanderen dat er zonder nevenvoorwaarden

een toegelaten oplossing wordt gevonden. Hiervoor dient voor het kiezen van een niet bestaande tak in de oorspronkelijke graaf een straf te worden geven die zwaarder is dan de winst die ermee gehaald wordt. Wel moet de eis $\sum x_i = m$ hierbij gehaald worden, opdat er geen clique gevonden wordt van minder dan m knopen, die een hogere waarde heeft dan de maximale clique van m knopen. Deze methode werkt echter slecht bij relaxaties.

In plaats van de negatieve waarden in de waardematrix op de plaatsen waar geen tak bestaat kunnen bij het optimaliseringsprobleem constraints meegenomen worden die niet toestaan dat een combinatie van knopen wordt gekozen waar geen tak tussen zit.

6.2 Complexiteit

Het vinden van een maximale clique in het algemeen is NP-compleet. Het vinden van een clique is namelijk equivalent aan het vinden van een co-clique in de complementaire graaf \bar{G} . Het co-clique probleem is af te leiden van een partitie probleem die op zijn beurt weer af te leiden valt van een 3-Sat probleem¹.

Het vinden van een maximaal gewogen clique van deze speciale vorm is ook NP-volledig. Bewijs hiervan gaat door aan te tonen dat er een reductie mogelijk is van *MAXIMUM 2-SATISFIABILITY*², zelfs als elke laag maar uit precies 2 knopen bestaat, en alle kosten gelijk zijn aan 0 of 1. De reductie gaat als volgt: voer voor elke variabele x een laag in ter grootte 2, met vertices zeg x en $-x$ (voor 'niet- x '). De graaf bestaat uit alle kanten $y - z$ tussen verschillende lagen. De kosten zijn 0 als er een clause ' y of z ' bestaat; anders zijn de kosten 1. Dan geldt: in het sat-probleem kan aan K clauses worden voldaan \Leftrightarrow de graaf heeft een m -klike met kost $C - m(m - 1)/2 + K$. Hierin is C het aantal clauses en m het aantal variabelen (= aantal lagen).

6.3 Methodes

In deze paragraaf zullen een aantal technieken besproken worden die gebruikt kunnen worden voor het vinden van de maximale gewogen clique. Het is hierbij de bedoeling, gezien de doelstelling van dit project, enige technieken (beknopt) te presenteren. Aangezien bewezen is in de vorige paragraaf dat het probleem NP-volledig is, zal toevlucht gezocht moeten worden tot benaderingsalgoritmes. Benaderingsalgoritmes (heuristieken) kunnen worden onderverdeeld in twee categorieën: probleemspecifieke algoritmes (tailor-made) en generieke algoritmes. De eerste categorie heeft als nadeel dat ze maar bruikbaar zijn voor één probleem en weinig flexibel zijn; een herdefinitie van het probleem kan de vraag voor een nieuw algoritme veroorzaken. Het gebruikt echter wel de specifieke kenmerken van het probleem, wat een betere oplossing kan opleveren of kan zorgen voor het sneller vinden van een oplossing.

¹in Schrijver[33] staat hiervan een voorbeeld

²zie Garey & Johnson [10]

De heuristieken zijn vaak lokale zoekmethoden die iteratief een (hopelijk) optimaal antwoord genereren, door in de omgeving van de huidige oplossing naar een andere (betere) oplossing te zoeken. Een nadeel hierbij is dat de methode vaak strandt in een lokaal optimum.

6.3.1 GAMS

Kwadratisch

De eerste, generieke, oplosmethode is het optimaliseringsprogramma GAMS het 0-1 kwadratisch programmeringsprobleem (6.2) uit paragraaf 6.1 te laten oplossen met behulp van de solver DICOPT. Deze solver³ is een programma voor het oplossen van mixed-integer niet-lineaire programmeringsproblemen. Deze levert niet gegarandeerd het globale maximum, als er al een oplossing wordt gevonden. DICOPT gebruikt een solver voor het gerelaxeerde probleem en een solver voor het zoeken van een geheeltallige oplossing. Het gerelaxeerde probleem wordt opgelost met een niet-lineair programmeringsalgoritme. GAMS kan hiervoor twee solvers gebruiken: MINOS en CONOPT. Deze solvers gebruiken verschillende algoritmes die verschillend presteren op de meeste probleeminstaties. Dit betekent dat MINOS goed presteert op bepaalde probleeminstaties, CONOPT beter werkt bij andere. Het is bijna onmogelijk te voorspellen hoe goed een solver op een bepaalde probleeminstatie werkt, GAMS kan dus niet de beste solver zelf kiezen. Bij de resultaten wordt hierop nog teruggekomen. Voor het vinden van een geheeltallige oplossing kunnen de solvers CPLEX en OSL worden gebruikt, die de Branch & Bound methode gebruiken.

Het model dat in GAMS ingevoerd kan worden ziet er als volgt uit:

$$\max \left(\sum x_i c(i) + \sum \sum y_i y_j c(ij) \right) \quad (6.4)$$

onder de voorwaarden:

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{i \in A_k} x_i = 1 \quad k = 1, \dots, m \\ x_i + x_j \leq 1 \quad \forall (i, j) : e_{ij} \notin E \quad (i \neq j) \\ x_i = y_i \quad \forall i \\ x_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \\ y_i \geq 0 \quad \forall i \end{array} \right\} \quad (6.5)$$

Lineair

Het 0-1 kwadratisch programmeringsprobleem kan ook gelineariseerd worden en met de solvers CPLEX of OSL worden opgelost. De formulering is dan:

$$\max \left(\sum x_i c(i) + \sum \sum y_{ij} c(ij) \right) \quad (6.6)$$

³de meeste solvers die hier gebruikt worden staan beschreven in de GAMS Solvershandleiding[9]

onder de voorwaarden:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i \in A_k} x_i &= 1 & k = 1, \dots, m \\ x_i + x_j &\leq 1 & \forall (i, j) : e_{ij} \notin E \quad (i \neq j) \\ y_{ij} &\geq x_i + x_j - 1 & \forall (i, j) \\ y_{ij} &\leq x_i & \forall (i, j) \\ y_{ij} &\leq x_j & \forall (i, j) \\ x_i &\in \{0, 1\} & \forall i \\ x_i &\geq 0 & \forall (i, j) \end{aligned} \right\} \quad (6.7)$$

Eigenschappen

De niet-lineaire doelfunctie maakt het gedrag van de solvers erg onvoorspelbaar. Om tot een goed resultaat te komen kan wat worden gesleuteld aan de instellingen van de solver, wat leidt tot wat trial & error. Dit is niet geschikt voor het geval er automatisch een antwoord gevonden dient te worden.

Het gelineariseerde model is erg groot. Dit oplossen met met behulp van Branch & Bound technieken kost zeer veel tijd.

6.3.2 Semi Definite Programming (SDP)

Het 0-1 kwadratisch programmeringsprobleem kan in matrix-notatie als volgt genoteerd worden:

$$q^* = \max\{x^T W x : x_i \in \{0, 1\}\}. \quad (6.8)$$

0-1 Kwadratisch programmeringsproblemen in deze vormen staan SDP relaxatie toe⁴.

De relaxatie kan op twee manieren plaatsvinden. De eerste SDP-relaxatie die gegeven wordt is makkelijk te gebruiken, omdat het in een vorm wordt gegoten waarvoor standaard software beschikbaar is. De relaxatie is helaas alleen strak als de bijbehorende graaf volledig is. In het tweede deel van deze paragraaf zal een SDP-relaxatie worden gegeven die strak is in het algemene geval.

Volledige graaf

Bij SDP wordt veelal gewerkt in $(-1, 1)$ variabelen. Daarvoor vindt de transformatie $z = 2x - 1$ plaats. Verder geldt dat vector e wordt gedefinieerd als de vector bestaande uit allemaal enen en dat indien een matrix met een constante wordt vermenigvuldigd wordt bedoeld dat elk element van de matrix afzonderlijk met die constante vermenigvuldigd wordt. (6.8) kan verder geschreven worden als⁵:

$$q^* = \max\left\{\left(\frac{1}{2}z + \frac{1}{2}e\right)^T W \left(\frac{1}{2}z + \frac{1}{2}e\right) : z_i \in \{-1, 1\}\right\}$$

⁴voor meer informatie over de relaxatie en verwijzingen naar oorspronkelijke literatuur hierover wordt verwezen naar de Klerk [20]

⁵eigenlijk wordt het kwadratisch programmeringsprobleem genoteerd met $\frac{1}{2}x^T W x$, maar in deze paragraaf zal de half worden weggelaten.

$$\begin{aligned}
&= \max\left\{\frac{1}{4}z^T W z + \frac{1}{2}e^T W z + \frac{1}{4}e^T W e : z_i \in \{-1, 1\}\right\} \\
&= \max\left\{\frac{1}{4}z^T W z + \frac{1}{2}z_{n+1}e^T W z + \frac{1}{4}e^T W e : z_i \in \{-1, 1\}\right\} \\
&= \max\{y^T A y + \frac{1}{4}e^T W e : y_i \in \{-1, 1\}\}
\end{aligned} \tag{6.9}$$

waarbij $y = \begin{pmatrix} z \\ z_{n+1} \end{pmatrix}$ en $A = \begin{pmatrix} \frac{1}{4}W & \frac{1}{4}e^T W \\ \frac{1}{4}(e^T W)^T & 0 \end{pmatrix}$.

Relaxatie

Een belangrijke eigenschap die gebruikt zal worden in het vervolg is

$$y^T A y = \text{Tr}(A y y^T),$$

waarbij $\text{Tr}(X)$ het spoor⁶ is van de matrix X . Daarmee is het maximaliseringsprobleem

$$\hat{q}^* = \max\{\text{Tr}(A Y) : Y = y y^T, \text{diag}(Y) = e\} \tag{6.10}$$

equivalent aan (6.9), waarbij $q^* = \hat{q}^* + \frac{1}{4}e^T W e$. Met $\text{diag}(Y)$ wordt hier de vector bedoeld bestaande uit de elementen van de diagonaal van de matrix Y . De matrix $Y = y y^T$ is positief semidefinit⁷ (genoteerd met $Y \succeq 0$) wat de basis is van de relaxatie.

Een constraint die meegenomen moet worden is dat voor alle treimbewegingen een knoop wordt gekozen. Hiervoor kan een constraint zoals (6.3) worden meegenomen, maar gezien de vorm van de graaf zal

$$\sum_{i=1}^n x_i = m \tag{6.11}$$

volstaan. De kostenstructuur zal voorkomen dat er twee alternatieven worden gekozen voor één treimbeweging (helaas is dit net de zwakke plek van de relaxatie). Het enige dat voorkomen dient te worden is dat er een clique wordt gevonden waarin niet alle treimbewegingen worden meegenomen en die beter is dan de beste oplossing waarbij wel alle treimbewegingen worden meegenomen. Constraint (6.11) kan worden herschreven tot

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n z_i + \frac{1}{2}n = m$$

Dit moet nog worden omschreven tot een uitdrukking in y . Definieer hiervoor de vector \tilde{e} als de vector met enen op de posities 1 tot en met n en een nul op plek $n+1$ en de matrix $\tilde{E} = (\tilde{e}\tilde{e}^T)$. Noem verder $k = 2m - n$. Nu geldt

$$\tilde{e}^T y = k \Leftrightarrow y^T (\tilde{e}\tilde{e}^T) y = k^2 \Leftrightarrow \text{Tr}(\tilde{E} Y) = k^2$$

⁶het spoor van een matrix is de som van de diagonaalelementen: $\text{Tr}(A) = \sum_i A_{ii}$

⁷een symmetrische matrix Y is positief semidefinit als $z^T Y z \geq 0 \forall z$

Dit alles bij elkaar geeft de SDP-formulering van het maximale gewogen clique probleem, zoals beschreven in het vorige hoofdstuk:

$$\hat{q}^* = \max\{\text{Tr}(AY) : Y = yy^T, \text{diag}(Y) = e, \text{Tr}(\tilde{E}Y) = k^2\} \quad (6.12)$$

Vervolgens kan om het probleem op te lossen de volgende relaxatie worden uitgevoerd⁸:

$$\hat{q}_R^* = \max\{\text{Tr}(AY) : Y \succeq 0, \text{diag}(Y) = e, \text{Tr}(\tilde{E}Y) = k^2\}. \quad (6.13)$$

Deze relaxatie geeft een bovengrens voor het oorspronkelijke probleem.

Afronding

Goemans en Williamson [12] geven een gerandomiseerd benaderingsalgoritme om uit het antwoord van het gerelaxeerde probleem (6.13) een antwoord op het ongerelaxeerde probleem (6.12) te vinden, speciaal geschikt voor max-cut problemen:

- Bereken de (Cholesky-) decompositie $Y^* = LL^T$, met Y^* de optimale oplossing van (6.13) en $L^T = (l_1, l_2, \dots, l_n)$
- Trek een vector r waarvoor geldt dat $\|r\| = 1$.
- Bereken voor alle i : $x_i = \begin{cases} -1 & \text{als } r^T l_i < 0 \\ 1 & \text{anders} \end{cases}$

Een andere mogelijkheid voor afronding, bij kleine problemen, is het gebruiken van Branch & Bound methoden.

Software

Er zijn enkele SDP-solvers vrij te verkrijgen en te gebruiken. Het beste werken de solvers die gebruik maken van speciale eigenschappen van een specifiek probleem. Het zou prettig zijn daar gebruik van te kunnen maken. In Benson [2] staat een probleem beschreven waarvoor een snel algoritme beschikbaar is en die gebruikt kan worden voor het maximaal gewogen clique probleem: het Unequal cut probleem. De semidefinitie relaxatie van dit probleem is:

$$\min \text{Tr}(CX) \quad (6.14)$$

onder de voorwaarden:

$$\left. \begin{array}{l} \text{diag}(X) = e \\ \text{Tr}(ee^T X) = \kappa^2 \\ X \succeq 0 \end{array} \right\} \quad (6.15)$$

⁸zie de Klerk [20]

Het maximaal gewogen clique probleem wordt in de SDP-relaxatie geschreven (analoog (6.12)) als

$$\max \text{Tr}(AY) \quad (6.16)$$

onder de voorwaarden:

$$\left. \begin{aligned} \text{diag}(Y) &= e \\ \text{Tr}(\tilde{e}\tilde{e}^T Y) &= \kappa^2 \\ Y &\succeq 0 \end{aligned} \right\} \quad (6.17)$$

Dit laatste probleem wijkt slechts in de tweede voorwaarde in (6.17) af van het unequal cut probleem. In plaats van de vector e wordt hier namelijk de vector \tilde{e} gebruikt. Ter herinnering: de vector e bestaat uit allemaal enen, de vector \tilde{e} heeft overal enen, behalve op de laatste plaats, daar staat een nul. Er geldt echter de eigenschap dat wanneer de vector y een optimale oplossing is van (6.13) dan is de vector $-y$ ook een optimale oplossing, waardoor het toevoegen van de eis $y_{n+1} = 1$ geen beperking is. Dit leidt tot het inzicht dat

$$yy^T = \begin{pmatrix} y_1^2 & y_1 y_2 & \cdots & y_1 y_n & y_1 y_{n+1} \\ y_1 y_2 & y_2^2 & \cdots & y_2 y_n & y_2 y_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ y_1 y_n & y_2 y_n & \cdots & y_n^2 & y_n y_{n+1} \\ y_1 y_{n+1} & y_2 y_{n+1} & \cdots & y_n y_{n+1} & y_{n+1}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{y}\bar{y}^T & \bar{y} \\ \bar{y}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (6.18)$$

met $\bar{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ en $y_{n+1} = 1$. De eis $\text{Tr}(\tilde{e}\tilde{e}^T Y) = \kappa^2$ geeft hier $\text{Tr}(ee^T \bar{y}\bar{y}^T) = \kappa^2$. Hieruit volgt, samen met $e^T \bar{y} = \kappa$ en $y_{n+1} = 1$, dat $\text{Tr}(ee^T yy^T) = \text{Tr}(ee^T \bar{y}\bar{y}^T) + 2e^T \bar{y} + y_{n+1}^2 = \kappa^2 + 2\kappa + 1 = (\kappa + 1)^2$, en dus geldt dat

$$\max \text{Tr}(AY) \quad (6.19)$$

onder de voorwaarden:

$$\left. \begin{aligned} \text{diag}(Y) &= e \\ \text{Tr}(ee^T Y) &= (\kappa + 1)^2 \\ Y &\succeq 0 \end{aligned} \right\} \quad (6.20)$$

een relaxatie is van (6.16) en (6.17) en precies in de vorm is van het unequal cut probleem. Zoals gezegd is dit alleen een goede relaxatie als de onderliggende graaf volledig is, omdat het gebruiken van niet bestaande takken is toegestaan wat leidt tot een zwakkere bovengrens.

Algemene relaxatie

Een modellering die algemeen geldt voor het vinden van maximaal gewogen clique van cardinaliteit m , en niet alleen voor volledige grafen, en die een strakkere bovengrens geeft is:

$$\max \text{Tr}(WX) \quad (6.21)$$

onder de voorwaarden:

$$X_{ij} = 0 \quad \forall (i, j) : e_{ij} \notin E \quad (i \neq j) \quad (6.22)$$

$$X = xx^T \quad x \in \{0, 1\}^n \quad (6.23)$$

$$\text{Tr}(ee^T X) = m^2 \quad (6.24)$$

$$\text{Tr}(e_i e_i^T X) = 1 \quad i = 1, \dots, m \quad (6.25)$$

waarbij E de verzameling takken is in de graaf $G = (V, E)$ en e_i de vector met enen op de plaats van de alternatieven van treinbeweging i . Voorwaarde (6.25) zorgt er nu voor dat voor elke treinbeweging maar één alternatief wordt gekozen en voorwaarde (6.24) zorgt ervoor dat er totaal m alternatieven wordt gekozen.

In de relaxatie wordt (6.23) vervangen door de voorwaarde

$$\begin{pmatrix} X & \text{diag}(X) \\ \text{diag}(X)^T & 1 \end{pmatrix} \succeq 0 \quad (6.26)$$

Deze voorwaarde komt af van en is equivalent met⁹:

$$X \succeq \text{diag}(X)\text{diag}(X)^T.$$

Dat deze relaxatie minstens even sterk is als de relaxatie $X \succeq 0$ met $X_{ii} \in [0, 1]$ blijkt uit:

$$X - \text{diag}(X)\text{diag}(X)^T \succeq 0 \Rightarrow X_{ii} - (\text{diag}_i(X))^2 \geq 0 \Leftrightarrow X_{ii} - X_{ii}^2 \geq 0 \Leftrightarrow X_{ii} \in [0, 1].$$

Voorwaarden (6.24) en (6.25) leiden nu niet meer noodzakelijk tot het gewenste resultaat en kunnen worden vervangen door voorwaarden met matrices (I en I_i) van hogere rang: $\text{Tr}(X) = m$ en $\text{Tr}(I_i X) = 1$ (de matrix I_i heeft enen op de diagonaal op de plaats van de alternatieven voor treinbeweging i). Bij gebruik dient te worden onderzocht welke voorwaarde beter werkt. Het kan wenselijk zijn met (6.24) en (6.25) te werken aangezien zij matrices van rang één zijn (ee^T en $e_i e_i^T$).

Software

In een artikel van Karisch[19] staat een softwarepakket beschreven die een cutting plane aanpak combineert met een SDP relaxatie van de vorm

$$\max \text{Tr}(WX) \quad (6.27)$$

onder de voorwaarden:

⁹via Schur complementen

$$\left. \begin{array}{l} \text{Tr}(A_i X) = a_i \quad i = 1, \dots, m_a \\ X \succeq 0 \end{array} \right\} \quad (6.28)$$

voor een probleem waarin m_a het aantal constraints en A_i de constraint matrices zijn. De beschikbare software is geschikt voor een aantal specifieke problemen en niet voor het algemene probleem. Wel kan zelf een aanvulling geprogrammeerd worden.

Eigenschappen

De SDP-methode werkt generiek voor 0-1 kwadratisch programmeringsproblemen, en werkt als volgt: eerst een gerelaxeerd probleem oplossen met behulp van inwendig-punt methodes, en vervolgens naar een geheeltallige oplossing zoeken.

Uit Benson, Ye en Zhang [2] blijkt dat soortgelijke problemen tot 7000 variabelen goed oplosbaar zijn. Hierbij zal aandacht moeten worden geschonken aan het vinden van afrondingsprocedures die, hetzij deterministisch, dan wel met hoge waarschijnlijkheid, leiden tot een afronding waarbij voldaan is aan de gelijkheidsrestricties zoals (6.24) en (6.25). Het gerandomiseerde benaderingsalgoritme, zoals beschreven in deze paragraaf zal vermoedelijk niet goed werken, aangezien deze geen rekening houdt met de restricties.

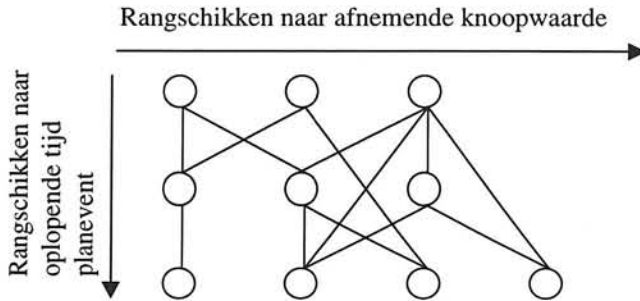
In de zeer nabije toekomst moet het mogelijk zijn voor problemen van rond de 500 variabelen (wat voor het probleem dat in dit rapport wordt beschreven aan de grote kant is) binnen één seconde een (zeer) goede oplossing te vinden.

6.3.3 Tailor-made Algoritme

In dit Tailor-made algoritme wordt heuristisch gezocht naar een toegelaten oplossing, die vervolgens verbeterd wordt. Verondersteld wordt dat de knopen (die de alternatieven voor de treinbewegingen voorstellen) zo geordend zijn, dat de alternatieven met een hoge knoopwaarde vooraan (in de figuur links) staan en de alternatieven met een lage knoopwaarde achteraan. Verder zijn de lagen met alternatieven voor de treinbewegingen naar plantijd van de oorspronkelijke beweging (planevent) geordend (zie figuur 6.1). Hieronder wordt de werking van het algoritme besproken. De precieze werking, uitgedrukt in quasi-pascal, staat in de tabellen C.1 en C.2 in bijlage C.

Zoeken toegelaten oplossing

- Kies als startoplossing uit elke laag de knoop met de hoogste waarde.
- Signaleer de harde conflicten, een hard conflict bestaat uit twee knopen, waar geen tak tussen zit. Als er geen zijn dan STOP.
- Zoek voor het eerste harde conflict (dat wil zeggen dat conflict waarvan één van de treinbewegingen het eerst gepland staat van alle andere conflicterende treinbewegingen) een toegelaten combinatie van twee knopen. Bij het zoeken naar de eerst



Figuur 6.1: Ordening in graaf

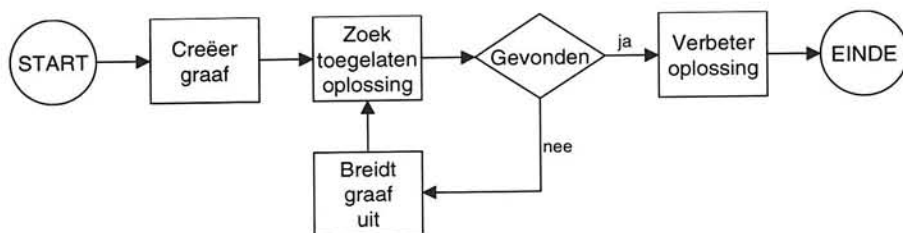
voorkomende toegelaten combinatie kan gekozen worden welke van de twee treinbewegingen het meest wordt verschoven in kosten. Dit wordt zo gedaan dat het eerst gevonden alternatief met die bepaalde keuze beter is (kijkend naar knoop- en takwaarde) dan wanneer de andere keuze was gemaakt. Als het niet lukt een toegelaten oplossing te vinden wordt voor dit conflict weer de oorspronkelijke situatie hersteld en wordt voor het voorgaande conflict een nieuwe oplossing gezocht. Zowel in het eerste als in het tweede geval mag die oplossing niet zo gekozen worden dat een conflict ontstaat die reeds voorgekomen is. Hiervoor wordt een tabu-lijst bijgehouden¹⁰. Indien er geen voorgaand conflict is, is er in deze graaf geen oplossing mogelijk en dient de graaf met enige knopen uitgebreid te worden, waarna weer opnieuw wordt begonnen bij het eerste punt.

- Signaleer de harde conflicten, als er geen zijn ga naar *verbeteren*, anders ga een stap terug.

Dit algoritme is recursief en eindig. Het is recursief omdat geprobeerd wordt een oplossing te vinden voor de rest van de primaire en secundaire conflicten gegeven bepaalde keuzes voor oplossingen van behandelde harde conflicten. Indien er voor de overblijvende conflicten geen oplossing wordt gevonden, wordt voor de laatst genomen beslissing een andere oplossing gezocht. Verder geldt de eindigheid omdat er, in de lagen van de graaf waarin op dat ogenblik wordt gezocht, geen combinatie van knopen kan worden gekozen, die een conflict oplevert die al eerder is voorgekomen.

Als er geen oplossing wordt gevonden moeten er enkele knopen worden toegevoegd, waarna er opnieuw gezocht kan worden (zie figuur 6.2).

¹⁰dit wordt later in deze paragraaf behandeld



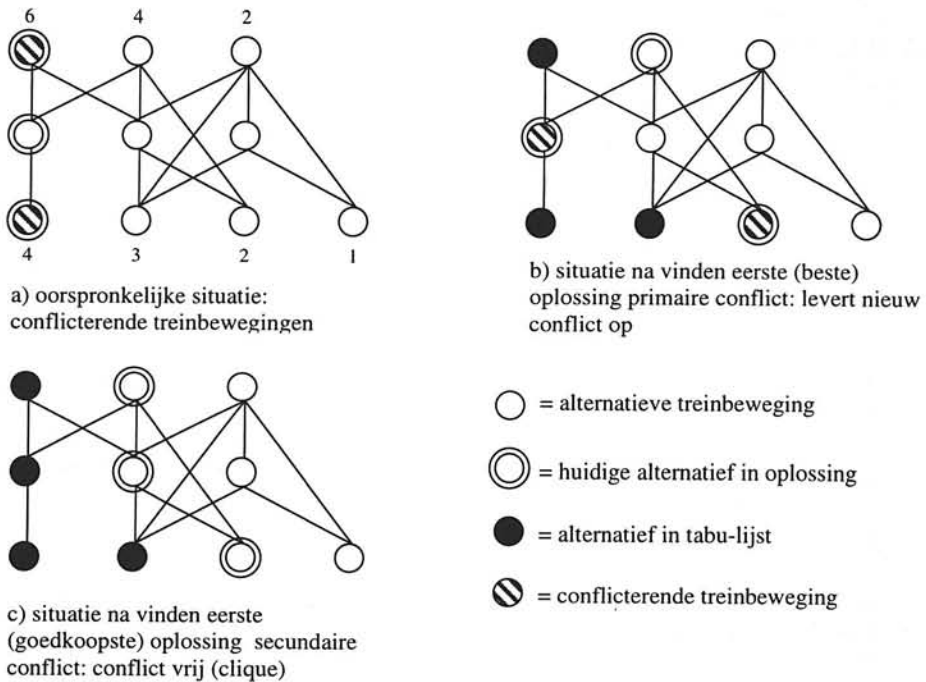
Figuur 6.2: Tailor-made algoritme

Voorbeeld 13 In figuur 6.3 staat een voorbeeld van het zoekproces naar een toegelaten oplossing. Figuur 6.3a geeft de huidige oplossing met daarin een hard conflict, de eerste twee stappen in het algoritme. Vervolgens wordt voor dat harde conflict de beste oplossing gezocht. Deze oplossing levert 6 op (de takwaarde wordt in dit voorbeeld buiten beschouwing gelaten), terwijl de eerste oplossing, waarbij de andere treinbeweging zo veel mogelijk bij de oorspronkelijke situatie wordt gehouden, 5 oplevert. Deze oplossing levert een situatie op met een ander conflict, zie figuur 6.3b. Dit conflict moet op zijn beurt opgelost worden. Dit levert de situatie op in figuur 6.3c. Bij het zoeken naar een oplossing voor dat conflict mogen niet de 'zwarte' knopen uit de tabu-lijst gebruikt worden. Indien er nog een ander primair conflict aanwezig is, waarvan minstens één van de treinbewegingen vroeger plaats vindt dan de vroegste van het primaire conflict, dan wordt er eerst voor dat primaire conflict een oplossing gezocht.

Verbeteren

- probeer de oplossing te verbeteren door te zoeken naar combinaties van knopen (met bijbehorende tak) die een leiden tot een clique die een hogere waarde heeft dan de huidige. In tabel 6.1 staan zes manieren waarop dat kan. Eerst moet onderscheid worden gemaakt naar de voorwaarde waarop besloten wordt deze combinatie te herzien. Dit kan door te kijken naar de waarde van de knopen met bijbehorende tak, of alleen naar de waarde van de tak tussen die twee knopen. Voor deze tak of tak-knoop combinatie is een maximale waarde bekend¹¹. Afwijken van deze waarde geeft aan dat een betere combinatie van knopen mogelijk is. Vervolgens kan het verbeteren op drie manieren plaatsvinden. Er kan worden gekeken naar de beste combinatie, naar alle combinaties die beter zijn of naar alle combinaties van knopen. Beste combinatie betekent hier dat de tak en knoopwaarde van deze twee knopen met bijbehorende tak

¹¹zie paragraaf 5.4.4



Figuur 6.3: Voorbeeld Tailor made algoritme

de grootste is van alle combinaties. Dit zegt nog niets over de waarde van de gehele clique. Bij elke combinatie van alternatieven moet worden gekeken of de combinatie ook leidt tot een hogere waarde van de clique. Hierbij kunnen eventuele harde conflicten optreden die volgens bovenstaand algoritme kunnen worden opgelost. Dit kan resulteren in een clique waarin de net gekozen combinatie niet meer in voor hoeft te komen. Indien er geen clique van hogere waarde wordt gevonden wordt natuurlijk de oude situatie behouden.

Voorstel voor gebruik is methode I, de eenvoudigste en snelste. Hierbij wordt voor elk tweetal knopen, waarvan de verbindende tak niet de maximaal mogelijke waarde heeft, gekeken wat de beste combinatie is van alternatieve events voor die treinbeweging met bijbehorende tak. Indien deze combinatie harde conflicten oplevert, moet een toegelaten oplossing (clique) voor het verkeersplan gezocht worden, zoals hierboven gebeurt. Deze nieuwe clique moet een hogere waarde hebben dan de oude oplossing om de verandering te accepteren. Deze verbeteringsmethode probeert voornamelijk aansluitingen te behouden en inhaal-conflicten op de vrije baan te voorkomen.

methode \ voorwaarde	takwaarde	tak en knoopwaarde
beste combinatie	I	IV
betere combinaties	II	V
alle combinaties	III	VI

Tabel 6.1: Mogelijke verbeteringsmethoden

methode	beschrijving
I	Lijst van combinaties van knopen die een conflict hebben gevormd in een oplossing.
II	Lijst van knopen die deel hebben uitgemaakt van een conflict.
III	Lijst van knopen die gebruikt zijn bij het vinden van een oplossing

Tabel 6.2: Mogelijke tabu-lijsten

Tabu-lijst

Het bijhouden van de tabu-lijst kan op een aantal manieren gebeuren. In tabel 6.2 zijn er enkele weergegeven. Zo kan er een lijst van conflicten worden gemaakt, zodat bij het zoeken naar een oplossing voor een conflict niet een knoop wordt gebruikt, terwijl dat een conflict oplevert die al in de lijst staat (I). Ook kan een lijst van knopen worden bijgehouden die in een conflict heeft gezeten die reeds is opgelost (II). Een minder fijnmazige methode tenslotte is het bijhouden van een lijst knopen die al eens bij het zoeken gebruikt zijn, hetzij in een oplossing, hetzij in het zoeken naar een oplossing (III).

Deze laatste methode is gebruikt in voorbeeld 13 en in het algoritme in tabel C.1 in bijlage C. Hier wordt ervoor gekozen bij het oplossen van de alternatieven niet terug te gaan naar eerdere knopen (met een hogere waarde). Als in het voorbeeld tabu-lijst I was gekozen dan hadden bij het zoeken naar een oplossing voor het tweede conflict, afbeelding (c), beide zwarte knopen uit de onderste laag gebruikt mogen worden. Beide knopen leiden namelijk niet tot een situatie met een reeds opgelost conflict. Tabu-lijst II had ervoor gezorgd dat de meest linker knoop niet had mogen worden gebruikt, maar de tweede van links wel.

Eigenschappen

Er kunnen voor dit algoritme geen garanties voor snelheid en optimaliteit gegeven worden, en het is alleen geschikt voor dit probleem. Wel is bekend dat het algoritme eindig is en dat de structuur van het probleem ervoor zorgt dat het antwoord dicht bij de verstoorde situatie wordt gezocht.

Dit algoritme eist wel een duidelijke structuur van de graaf, waaronder een ordening

naar afnemende kosten per treinbeweging (een laag in de graaf). De startoplossing die hierbij wordt genomen bestaat uit de eerste knoop van elke laag. Als de graaf bestaat uit de planevents en alternatieve events die een latere tijd hebben dan de bijbehorende planevents, dan zal deze beginoplossing precies het huidige verkeersplan voorstellen. Als er wel alternatieve events worden toegevoegd met een vroegere tijd, dan kunnen er in de startoplossing meer conflicten zitten en zelfs conflicten die in een eerdere oplossing al opgelost zijn. Aangezien de oplosruimte wordt vergroot met betere alternatieven is het voor de hand liggend dat er wel een betere oplossing wordt gevonden. Dit probleem is al eerder behandeld in paragraaf 5.3.3.

6.3.4 Descent/Ascent methode

Hier zullen algoritmen¹² besproken worden voor het probleem beschreven door (6.2) en (6.3), dat hier iets herschreven wordt tot de relaxatie:

$$\max x^T W x \quad (6.29)$$

onder de voorwaarden

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{i \in A_k} x_i = 1 \quad k = 1, \dots, m \quad (I) \\ 0 \leq x \leq e \quad (II) \end{array} \right\} \quad (6.30)$$

Geprobeerd zal worden dit gerelaxeerde probleem iteratief te maximaliseren, door steeds naar een oplossing te zoeken die beter is dan de huidige, tot een maximum is bereikt. De algoritmen gaan in grote lijnen als volgt:

1. Vind een zoekrichting voor de doelfunctie.
2. Zoek het maximum van de doelfunctie langs de zoekrichting.
3. Indien de oplossing 'voldoende goed' is, maak er een binaire oplossing van.

In Warners[34] wordt een procedure gegeven om van de niet-geheeltallige oplossing een geheeltallige oplossing te maken, die niet slechter is. De voorwaarden waar het probleem aan moet voldoen om deze eigenschap te hebben, worden gehaald. Het idee is dat als je alle variabelen even vastzet, behalve de variabelen die voorkomen in een gelijkheidsbeperking k van I in (6.30), dat dan een triviaal LP probleem ontstaat. Dit kan eenvoudig worden opgelost, wat een binaire optimale oplossing geeft. Voor het vinden van een nieuwe zoekrichting worden hier twee methoden gegeven. Eerst de potential reduction methode, vervolgens een gradient-methode.

¹²de algoritmen zijn voor het grootste gedeelte analoog Warners [34]

Potential reduction methode

Het idee hierbij is dat het oplossen van (6.8) equivalent is met het oplossen van

$$\min \psi(x) = \min x^T W x + \mu \sum_{i=1}^n \log x_i (1 - x_i) \quad (6.31)$$

onder de voorwaarde

$$0 \leq x \leq e, \quad (6.32)$$

waarbij ψ een weighted logarithmic barrier functie is en μ de positieve barrier parameter. Het probleem (6.32) wordt nu iteratief opgelost door het te benaderen met een 0-1 kwadratisch optimaliseringsprobleem op een ellipsoïde.

Als vervolgens de voorwaarde $0 \leq x \leq e$ wordt genoteerd met $Ux \leq c$ en de huidige oplossing in de iteratie x^k , dan stelt $s^k = c - Ux^k$ de bijbehorende slack vector voor, en noteer¹³ $S = \text{diag}^{-1}(s^k)$. Hiermee kunnen de gradient en de Hessiaan van ψ in x^k berekend worden:

$$\begin{aligned} h_\psi &= Wx^k + \mu U^T S^{-1} e \\ H_\psi &= W + \mu U^T S^{-2} U. \end{aligned}$$

Vervolgens kan de tweede order Taylor-reeks gegeven worden van ψ in de buurt van x^k :

$$\mathcal{W}(x) = (\Delta x)^T H_\psi \Delta x + h_\psi^T \Delta x + \psi(x^k),$$

met $\Delta x = x - x^k$. Deze benadering wordt gemaximaliseerd op de Dikin-ellipsoïde:

$$\mathcal{E}(r) = \{\Delta x \in \mathbb{R}^m \mid (\Delta x)^T U^T S^{-2} U \Delta x \leq r^2\}.$$

Gradient methode

Gegeven een startoplossing x moet nu een aanpassing Δx gevonden worden waarvoor geldt

$$(x + \Delta x)^T W (x + \Delta x) > x^T W x$$

met als voorwaarde $x + \Delta x \in [0, 1]^n$. Deze Δx zal zo worden gekozen dat $f(\Delta x) = \Delta x^T W x$ maximaal is, waarbij $-x \leq \Delta x \leq e - x$. Wx is de gradient van de doelfunctie. Aangezien $f(\Delta x)$ lineair in Δx is, zal één van de uiterste waarden gekozen worden. Het probleem wordt nu:

$$\max \Delta x^T W x$$

eventueel onder de voorwaarden $\sum_{i \in \mathcal{A}_k} x_i + \Delta x_i = 1$, $k = 1, \dots, m$ en $-x_i \leq \Delta x_i \leq 1 - x_i$. Dit is een LP-probleem.

Eigenschappen

Dit algoritme is een generiek algoritme en bruikbaar voor veel soorten optimaliseringsproblemen. Een nadeel echter is dat het strandt in lokale optima, waarvan er in het probleem waar een heuristisch voor gezocht wordt waarschijnlijk zeer veel van zijn.

¹³analoog het eerdere gebruikte $x = \text{diag}(X)$

Simulated Annealing algoritme [8]

Kies een beginoplossing $i \in S$.
 Kies een intiele temperatuur $T > 0$.
 Maak temperatuur-teller $t = 0$.
 Repeat
 Maak teller $n = 0$.
 Repeat
 Genereer een buur j van i .
 Bereken $\delta = f(j) - f(i)$.
 Als $\delta > 0$ dan maak $i := j$,
 anders als $\text{random}(0,1) < \exp(-\delta/T)$ dan $i := j$.
 $n := n + 1$
 until $n = n(T)$.
 $t := t + 1$
 $T := T(t)$;
 until stopcriterium waar

Tabel 6.3: Simulated Annealing algoritme

6.3.5 Simulated Annealing

Simulated Annealing is een methode om goede resultaten te verkrijgen voor moeilijke optimaliseringsproblemen. In normale descent/ascent methoden, zoals hierboven, start het algoritme met een (random) startoplossing. Vervolgens wordt een omgeving van deze oplossing volgens een standaardmechanisme gecreëerd. Als er een verbetering wordt gevonden in vergelijking met de huidige situatie, wordt de huidige situatie vervangen door de betere. Dit proces wordt herhaald tot er geen verbetering mogelijk is.

Het grote nadeel is dat deze methode vaak in een lokaal optimum terecht komt, misschien zelfs ver van de optimale. Een manier om dat te omzeilen is het herhalen van de methode met steeds een ander startpunt. In Simulated Annealing wordt geprobeerd het stranden in lokale minima te vermijden door soms een nieuwe oplossing te accepteren die slechter is dan de oorspronkelijke, gemeten met een of andere functie f . De acceptatiekans van een verslechtering ter grootte δ met betrekking tot f wordt de acceptatiefunctie genoemd en is meestal $\exp(-\delta/T)$, waarbij T een controlparameter is. De parameter T komt van temperatuur uit de natuurkunde, waar Simulated Annealing van is afgeleid. Het algoritme, een voorbeeld staat in tabel 6.3, begint meestal met een hoge waarde voor T , waardoor de meeste verslechtingen worden geaccepteerd, om het vroeg belanden in een lokaal optimum te voorkomen. Na verloop van tijd wordt T steeds verder verlaagd.

Voor het gebruik van Simulated Annealing moet een aantal keuzes gemaakt worden. Ten eerste zijn er de probleem afhankelijke keuzes. Hiervoor moet het probleem goed gedefinieerd zijn, zodat de verzameling mogelijke oplossingen bekend is. Verder moet gedefinieerd zijn wat een naburige oplossing is. Dit kan in het kwadratische optimaliserings

probleem de oplossing zijn waarbij voor een knoop de waarde wordt verwisseld, of, zoals bij het tailor-made algoritme, een combinatie van twee knopen uit twee lagen. Ook de functie f moet vast liggen.

Vervolgens moeten een aantal algemene keuzes gemaakt worden. Deze zijn de beginwaarde van de temperatuurparameter T , de temperatuurfunctie $T(t)$, het aantal iteraties per temperatuur $N(t)$ en het stopcriterium¹⁴.

In Van Laarhoven[21] staat een wiskundige beschrijving van het algoritme, door middel van een Markov-keten en bewijs van asymptotische convergentie met kans 1 naar het globale optimum. Als het namelijk mogelijk is van een toestand i naar een willekeurige andere toestand j te gaan in een eindig aantal stappen, met kans ongelijk nul, dan heeft de Markov-keten die het algoritme beschrijft een unieke stationaire verdelingsfunctie, onafhankelijk van het startpunt. Deze verdeling is gelijk aan de Boltzmann-verdeling in de natuurkundige variant. De limiet van deze verdeling, als $T \rightarrow 0$, is de uniforme verdeling over de verzameling van optimale oplossingen. Het aantal stappen naar deze toestand kan echter zeer groot zijn, namelijk kwadratisch in de omvang van de oplossingsruimte.

Bij Simulated Annealing is het verder handig de beste oplossing tot nu toe te onthouden, aangezien er gekozen kan worden voor een slechtere oplossing. Verder kan het gecombineerd worden met een vorm van Tabu-search, waarbij bepaalde oplossingen niet beschouwd worden en waarbij wordt onthouden wordt welke oplossingen al zijn bekeken, opdat dat niet voor een tweede keer gebeurt. In een voor Railned uitgevoerd onderzoek door Ruiters [29] is een dergelijk algoritme gebruikt voor het verbeteren op service-criteria van de routing van treinen door stations.

Eigenschappen

Zoals beschreven is Simulated Annealing een generieke oplossingsmethode die probeert te voorkomen in lokale optima verzeild te raken.

6.3.6 Spectraal Algoritme

In Jurisch [18] worden algoritmen gepresenteerd voor het vinden van een minimale¹⁵ clique in een volledige graaf. Het idee achter deze heuristieken is het gebruiken van eigenwaarden om een verzameling oplossingen te genereren, in polynomiaal begrensde tijd, deze oplossingen te evalueren en de beste te kiezen. Daarna kan deze oplossing worden verbeterd met behulp van lokale zoektechnieken.

Definieer de clique-indicatorvector $x = \{0, 1\}^n$, met $x_i = 1$ als knoop i in de oplossing zit en de matrices W , de gewichtenmatrix van de graaf, en $P(x)$ de matrix met $p_{ij} = x_i x_j$. Er

¹⁴Voorbeelden hiervan zijn in de literatuur te vinden, zie bijvoorbeeld Eglese [8] en Van Laarhoven [21]

¹⁵deze kunnen ook voor een maximale clique gebruikt worden door de teken van de waardematrix om te klappen

wordt gezocht naar een clique ter grootte m . De volgende vergelijking kan worden afgeleid:

$$\begin{aligned} \|W - P(x)\|^2 &= \|W\|^2 - 2 \sum_{i,j} w_{ij} p_{ij}(x) + \|P(x)\|^2 \\ &= \|W\|^2 + m^2 - 2 \sum_{i,j} w_{ij} x_i x_j. \end{aligned}$$

Omdat $\sum_{i,j} w_{ij} x_i x_j$ net de waarde van de clique is, geldt dat het vinden van een minimale clique hetzelfde is als het maximaliseren van $\|W - P(x)\|^2$.

De volgende twee eigenschappen (zonder bewijs) vormen de basis van het algoritme:

- De Hoffman-Wielandt ongelijkheid zegt dat de (Euclidische) afstand tussen twee $n \times n$ matrices A en B voldoet aan de volgende ongelijkheid:

$$\sum_{i=1}^n (\mu_i - \lambda_{\sigma(i)})^2 \leq \|A - B\|^2 \leq \sum_{i=1}^n (\mu_i - \lambda_{\tau(i)})^2, \quad (6.33)$$

voor permutaties σ en τ van $\{1, 2, \dots, n\}$, waar μ_i en λ_i de eigenwaarden zijn van respectievelijk A en B .

- De matrix $P(x)$ met $m = \#\{i | x_i = 1\}$ heeft precies één eigenwaarde ongelijk aan nul, namelijk $\lambda = m$. De genormaliseerde eigenvector die daarbij hoort is v , met $v_i = (s/\sqrt{m})x_i$ en $s \in \{-1, 1\}$.

Dit laatste, samen met de rechterkant van de Hoffman-Wielandt (6.33) ongelijkheid geeft

$$\|W - P(x)\|^2 \leq (\mu_r - m)^2 + \sum_{i=1, i \neq r}^n \mu_i^2$$

voor een zekere $1 \leq r \leq n$ waarbij de μ_i de eigenwaarden van W zijn. Aangezien er slechts één eigenwaarde van $P(x)$ niet nul is, zijn er slechts n waarden van r mogelijk. Laat nu U de matrix zijn met als kolommen de orthonormale eigenvectoren van W en $M = \text{diag}^{-1}(\mu_1, \dots, \mu_n)$ de matrix met de eigenwaarden van W op de diagonaal. Dan kunnen de matrices $P(x)$ en W gedecomposeerd worden¹⁶: $W = UMU^T$ en $P(x) = vmv^T$. Hieruit volgt

$$\|W - P(x)\|^2 = \|UMU^T - vmv^T\|^2 = \|M - (U^T v)m(U^T v)^T\|^2$$

Als er nu een vector v kan worden gevonden waarvoor geldt dat $U^T v = J$, waarbij J de vector is met $j_r = 1$ en $j_i = 0$ als $i \neq r$, dan zou de gelijkheid

$$\|W - P(x)\|^2 = (\mu_r - m)^2 + \sum_{i=1, i \neq r}^n \mu_i^2$$

¹⁶omdat $U^T U = I$ en $v^T v = 1$

gelden en dus nam $\|W - P(x)\|^2$ zijn maximum aan. Het kan echter zijn dat deze v niet gevonden kan worden, waardoor gezocht moet worden naar die v die $\|U^T v - J\|$ minimaliseert. Afgeleid kan worden:

$$\begin{aligned} \|U^T v - J\|^2 &= \|v - UJ\|^2 \\ &= \sum_{i=1}^n v_i^2 - 2 \sum_{i=1}^n v_i u_{ir} + \sum_{i=1}^n u_{ir}^2 \\ &= 2 - 2 \frac{s}{\sqrt{m}} \sum_{i=1}^n u_{ir} x_i \end{aligned}$$

De heuristiek gaat nu alle mogelijkheden van het drietal (s, r, m) af, en zoekt voor elk van hen die vector x die $\sum_{i=1}^n u_{ir} x_i$ maximaliseert.

Algoritme

1. Zoek de orthonormale eigenvectoren u_j van W
2. Voor elke (s, r, m) los het volgende probleem op:

$$P(s, r, m) : \max s \sum_{i=1}^n u_{ir} x_i$$

onder de voorwaarden

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n x_i = m \\ x_i \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, n \end{array} \right\}$$

In het probleem, maximaal gewogen clique, waar we deze techniek voor kunnen gebruiken is m bekend, namelijk het aantal treinbewegingen. Verder geldt dat $\max\{P(1, r, m)\} = \min\{P(-1, r, m)\}$, dus hoeft alleen $s = 1$ te worden beschouwd. Het algoritme lost dus n keer het probleem $P(s, r, m)$ op, dat zelf de m grootste elementen u_{ir} zoekt, in lineaire tijd. Stap 2 kost dus $O(n^2)$ tijd.

Eigenschappen

Dit algoritme levert slechts een lokaal optimum, als startpunt voor verdere optimalisatie. Hierna zal nog een verbeteringsalgoritme gebruikt moeten worden om een beter antwoord te vinden. In het betreffende artikel worden als voorbeeld job-exchange procedure en tabu-search genoemd. In het in dit rapport beschreven probleem kan met andere methodes veel eenvoudiger een beginoplossing bepaald worden.

6.3.7 Conclusies

In de vorige subparagrafen zijn een aantal zoekmethoden opgenoemd en uitgewerkt die gebruikt kunnen worden om een (maximaal) gewogen clique te zoeken in een graaf. Deze opsomming is natuurlijk niet volledig, er kan ook nog worden gedacht aan neurale netwerken (zoals in MARCO) en genetische algoritmes.

Gezien de snelheid die nodig is, ligt het voor de hand de, waarschijnlijk, snelste methode te implementeren: het tailor-made algoritme. Verder zal ter vergelijking en/of om een bovengrens te bepalen een andere methode gebruikt worden. Aangezien er (nog) geen geschikte solver is voor de algemene SDP-relaxatie zal gekozen worden voor GAMS. Kleinere problemen kunnen natuurlijk ook exact uitgerekend worden, door enumeratie van alle oplossingen. Verdere details hiervan staan in het volgende hoofdstuk.

6.4 Post-processing

In paragraaf 5.1 is als laatste stap post-processing genoemd. Hiermee wordt de overgang van de oplossing, zoals die door de oplosmethode is gevonden, naar het verkeersplan bedoeld. De gekozen knopen moeten worden vertaald naar acties in het verkeersplan. Bovendien kan er aan gedacht worden hier een omrekening van de discrete oplossing naar de continue werkelijkheid te laten plaatsvinden. Als bijvoorbeeld tijdssprongen van een minuut wordt gebruikt, terwijl de benodigde rijweg voor een treinbeweging maar een gedeelte van de voorgaande minuut wordt gebruikt door een andere treinbeweging, is het handig de treinbeweging iets te vervroegen.

Indien aansluitingen worden verbroken worden deze beslissingen hier vastgelegd. Ook vind hier de daadwerkelijke toewijzing van nieuw personeel en materieel toe aan treinbewegingen indien dat door het verbreken van aansluitingen noodzakelijk is. Bij het oplossen van de probleeminstantie wordt slechts geconstateerd of er voldoende materieel of personeel aanwezig is.

Hoofdstuk 7

Resultaten

In dit hoofdstuk zullen de resultaten worden gegeven van de testen die zijn uitgevoerd met een aantal van de in het vorige hoofdstuk genoemde zoekmethodes naar een maximaal gewogen klik. Hiervoor zijn een aantal testinstanties en testscenario's gemaakt die in de eerste paragraaf gepresenteerd worden. Vervolgens wordt aangegeven hoe voor deze testinstanties de bijbehorende graaf wordt opgebouwd. Tenslotte worden voor de scenario's de resultaten weergegeven.

7.1 Testinstanties

Voor een eenvoudige test van de oplosstrategieën worden twee testinstanties gebruikt. De testinstanties bevatten uitvoerbare verkeersplannen voor de verschillende stations. In het tweede deel van deze paragraaf zal een aantal scenario's voor deze testinstanties worden gegeven.

7.1.1 Basisgegevens

De eerste testinstantie is een klein databestand met daarin de (werkelijke) situatie in Hilversum. Hilversum heeft 3 perronsporen en 6 In/Uitrij-sporen (I/U-sporen), twee richting Weesp, twee richting Hollandsche Rading en twee richting Baarn. De testinstantie bestaat uit 30 treinbewegingen in één uur, bestaande uit IC (die niet in Hilversum stoppen), snel-, stop- en goederentreinen. Het aantal routes op Hilversum is zeer beperkt en ook perronwisselingen zijn niet voor de hand liggend. Er is echter genoeg ruimte in het plan om wijzigingen op te vangen. Er is een databestand gemaakt waarin te lezen staat welke routes conflicteren.

De tweede testinstantie, Utrecht CS, is gecreëerd uit *DONS*- en *STATIONS* gegevens, en beschrijft dus niet de huidige situatie. Utrecht CS heeft 18 perronsporen, 3 tussensporen en 19 I/U-sporen. Het databestand bestaat uit 176 treinbewegingen, waarvan er 44 dummie treinbewegingen zijn, die geen aanspraak maken op een stuk infrastructuur. In de aangeleverde data wordt er namelijk niet gerangeerd, maar lossen aankomende treinbe-

wegingen (die hun eindpunt in Utrecht CS hebben) spontaan op en ontstaan beginnende treinbewegingen ook zonder dat er eerst een treinstel voor is neergezet. Er is voor gekozen ook in de testinstantie deze aankomende en vertrekkende treinen spontaan te laten ontstaan dan wel te laten verdwijnen, rekening houdend met voldoende in of uitstaptijd.

Tenslotte zijn er voor Utrecht twee databestanden gecreëerd. In de eerste staan combinaties van beginspoor, eindspoor en route, voor het bepalen van alternatieve perrons en routes, in de tweede staan de routes met hun sectie nummers, waaruit bepaald kan worden of routes conflicteren. In bijlage D staan afbeeldingen van de gebruikte verkeersregelpunten.

De informatie die in de databestanden staat, bestaat per treinbeweging uit de volgende items:

- identificatienummer
- soort beweging (aankomst, vertrek, doorgaande rit)
- tijd volgens dienstregeling
- voorspelde tijd door rit
- soort trein (intercity, hoge snelheid, interregio, regio of goederen trein)
- beginspoor (I/U-spoor voor aankomende treinbeweging, perron of tussenspoor voor een vertrekkende treinbeweging)
- doelspoor (net andersom als bij beginspoor)
- detailroute
- tijd gebruik detailroute
- aansluitingen en soort aansluitingen

De verkeerplannen kunnen worden gevonden in bijlage B.

7.1.2 Scenario's

Om de verschillende oplosmethoden te testen zijn er een aantal testscenario's gecreëerd, twee voor verkeersregelpunt Hilversum en twee voor verkeersregelpunt Utrecht CS. Het eerste en derde scenario zijn random gegenereerd. Uit het eerste scenario is het tweede gemaakt om te testen op het verbreken van aansluitingen en het vierde is aangeleverd door E. Weits om enkele veronderstellingen van het onderliggende model bloot te leggen.

Voor elk scenario wordt beschreven hoe lang de plan en randhorizon zijn, uit hoeveel treinbewegingen het verkeersplan bestaat, welke aansluitingen er (extra) gedefinieerd zijn, de door de ritten gemelde vertragingen en de door het verkeersplan geconstateerde conflicten.

Scenario 1

station: Hilversum
 begin planhorizon: 812
 lengte planhorizon: 20 minuten
 lengte randhorizon: 25 minuten
 aantal treinbewegingen: 26

Extra gedefinieerde aansluitingen:

rit	pt	rit	pt	soort
5823	812	25723	818	reiziger

Gemelde vertragingen:

rit	pt	vertraging
5823	812	+4
25722	814	+6
21625	822	+2
1625	825	+2

Geconstateerde conflicten:

nummer	ritnummer	ritnummer	soort
1	5823	5823	aansluiting
2	25722	25723	aansluiting
3	1625	15737	route

Scenario 2

station: Hilversum
 begin planhorizon: 812
 lengte planhorizon: 30 minuten
 lengte rand horizon: 15 minuten
 aantal treinbewegingen: 26

Veranderde plantijd (om een extra aansluiting te kunnen realiseren):

rit	beweging	oude pt	nieuwe pt
5823	vertrek	814	816

Extra gedefinieerde aansluitingen:

rit	pt	rit	pt	soort
5823	812	25723	818	reiziger
25722	814	5823	816	reiziger

Gemelde vertragingen:

rit	pt	vertraging
25722	814	+8
21625	822	+2
1625	825	+5

Geconstateerde conflicten:

nummer	ritnummer	ritnummer	soort
1	25722	5823	aansluiting
2	25722	25723	aansluiting
3	1625	15737	route

Scenario 3

station: Utrecht CS
 begin planhorizon: 814
 lengte planhorizon: 20 minuten
 lengte randhorizon: 25 minuten
 aantal treinbewegingen: 124

Gedefinieerde aansluitingen:

rit	pt	rit	pt	soort
148T2	814	049T1	817	reiziger
147H3	816	181H1	818	reiziger
006H1	821	147T4	825	reiziger
003T1	825	008T1	834	reiziger
181T2	830	008T1	834	reiziger

Gemelde vertragingen:

rit	pt	vertraging
148T2	814	+3
147H3	816	+4
041H1	818	+6
006H1	821	+3
003T1	825	+5

Geconstateerde conflicten:

nummer	ritnummer	ritnummer	soort
1	148T2	049T1	aansluiting
2	148T2	148T2	aansluiting
3	147H3	181H1	aansluiting
4	147H3	147H3	aansluiting
5	041H1	041H1	aansluiting
6	041H1	064T2	rijweg
7	006H1	006H1	aansluiting
8	006H1	147T4	aansluiting
9	003T1	181T2	rijweg
10	003T1	003T1	aansluiting

Scenario 4

station:	Utrecht CS
begin planhorizon:	814
lengte planhorizon:	20 minuten
lengte randhorizon:	25 minuten
aantal treinbewegingen:	124

Gedefinieerde aansluitingen:

rit	pt	rit	pt	soort
148T2	814	049T1	817	reiziger
147H3	816	181H1	818	reiziger
006H1	821	147T4	825	reiziger
003T1	825	008T1	834	reiziger
181T2	830	008T1	834	reiziger

Gemelde vertragingen:

rit	pt	vertraging
003T1	825	+15

Geconstateerde conflicten:

nummer	ritnummer	ritnummer	soort
1	003T1	003T1	aansluiting
2	003T1	008T1	aansluiting
3	003T1	045T1	rijweg

7.2 Opbouwen graaf

Aangezien BASIS, waarbinnen dit project een plaatsje vindt, een generiek framework aanlevert voor simulatieprojecten en er nog geen daadwerkelijke uitvoering plaatsvindt van een

simulatiestudie, is het moeilijk direct verbinding te maken tussen de projecten. Bovendien staat de keuze voor het simulatiepakket nog niet vast, wat aansluiting ook bemoeilijkt. Het lijkt daarom voor de hand te liggen een eigen omgeving te creëren voor het testen van de algoritmes, waarbij gekeken zal worden naar de beoordelingscriteria.

7.2.1 Planhorizon

Bij de implementatie zal een verkeersplan worden gemaakt voor een beperkte planhorizon (15-30 minuten). De treinbewegingen buiten deze planhorizon worden wel in de graaf opgenomen, maar zonder alternatieven. Dit moet voorkomen dat een beperkte planhorizon leidt tot het uitstellen van de 'moeilijke' treinbewegingen tot na de planhorizon. Het nieuwe verkeersplan moet consistent zijn met de treinbewegingen die erop volgen. Dit is reeds behandeld in paragraaf 3.4.2.

7.2.2 Implementatie

Voor het opbouwen van de graaf is een implementatie gemaakt in Delphi-2. Voor Railned is een specificatie van de implementatie gemaakt, te vinden in Phillipson[28]. Bij de opbouw van de graaf zijn een aantal stappen herkenbaar:

1. Detecteren harde en zachte conflicten in huidige verkeersplan.
2. Toevoegen alternatieven voor treinbewegingen:
 - zachte conflicten krijgen voldoende alternatieven in tijd en alternatieven in rijweg.
 - perronconflicten krijgen voldoende alternatieven in tijd en alternatieven in perron. Voor de alternatieve perron wordt in een databestand gezocht naar een perron die, gegeven de I/U-sporen van die rit, uitvoerbaar is.
 - rijwegconflicten krijgen voldoende alternatieven in tijd en alternatieven in rijweg. Voor de alternatieve rijweg wordt gezocht in een databestand.
 - niet conflicterende treinbewegingen binnen de planhorizon krijgen een beperkt aantal alternatieven in tijd (bijvoorbeeld 3).
 - niet conflicterende treinbewegingen buiten de planhorizon krijgen geen alternatief.
3. Toekennen waarden aan knopen en takken van de graaf. Hiervoor is in het testprogramma een zeer eenvoudige variant gekozen, zonder expliciet contact met naburige verkeersregelpunten. Er wordt namelijk alleen gekeken naar conflicten op de vrije baan en snelle treinen krijgen prioriteit, vanwege eventuele aansluitingen.

Voldoende betekent hier dat voldaan moet zijn aan de eis, gedefinieerd in paragraaf 5.5. In de implementatie is, indien nodig één alternatieve rijweg en/of perron toegevoegd. Het

aantal tijdsalternatieven is sterk afhankelijk van het soort conflict en soort trein. Dit kan variëren van 5, in geval van een hogesnelheidstrein tot 20 voor een goederentrein. Voor een uitgewerkte graaf voor scenario 3 zie bijlage E.

7.3 Testresultaten

De scenario's uit paragraaf 7.1.2 zijn op verschillende manieren doorgerekend: optimaal (door te enumereren), met het tailor-made algoritme, via GAMS en met een random-algoritme. De resultaten van deze berekeningen worden in de paragraaf weergegeven.

Het random-algoritme zoekt een clique in de graaf door voor elke treinbeweging willekeurig een alternatief te kiezen. Indien dat alternatief met de al eerder gevonden punten geen clique vormt of als er in de resterende treinbewegingen geen clique gevonden kan worden, dan wordt het volgende alternatief gekozen. Het random-algoritme herhaalt het zoeken naar een clique n^2 keer en onthoudt de beste. Het tailor-made algoritme moet in ieder geval beter scoren dan een random-algoritme om geloofwaardig te zijn.

Voor het vergelijken van de verschillende waarden wordt als 100% de waarde genomen die het uitvoerbare verkeersplan zou krijgen in de niet-verstoorde situatie. Dan zou namelijk elke knoop- en takwaarde de maximale waarde aannemen¹. Aangezien het om kleine verstoringen gaat zal dit een redelijk strakke bovengrens zijn. De berekeningen zijn uitgevoerd op een PII-266 PC.

Verder wordt voor elk van de scenario's aangegeven uit hoeveel knopen de graaf bestaat, dus hoeveel planevents en alternatieven events zijn meegenomen, hoeveel verschillende verzamelingen van m knopen (één uit elke laag) er gemaakt kunnen worden en voor de kleine scenario's hoeveel uitvoerbare verkeersplannen (cliques) gevonden kunnen worden in de graaf. Tenslotte worden de genomen beslissingen gepresenteerd.

7.3.1 Resultaten Scenario 1

aantal knopen:	89
orde aantal mogelijke verkeersplannen:	10^9
orde aantal uitvoerbare verkeersplannen:	$3.2 * 10^5$

methode	score	reketijd (seconde) ²
optimaal	17544 (99.97%)	72.45
tailor-made (stap 1)	17544 (99.97%)	0.00
tailor-made (stap 2)	17544 (99.97%)	0.00
GAMS (MINOS5)	17544 (99.97%)	0.41
random ³	17514 (99.80%)	64.73

¹zie paragraaf 5.4.4

²de precisie ligt bij 1 honderdste seconde

³de score is het gemiddelde bij duizend herhalingen; beste: 17528, slechtste: 17502

Bij alle methoden moet eerst de graaf worden opgebouwd, wat ongeveer 0.01 seconde duurt. De optimale oplossing leidt tot de volgende beslissingen:

- vertraag vertrek rit 5823 van 814 naar 817
- vertraag vertrek rit 25723 van 818 naar 821
- vertraag vertrek rit 15737 van 827 naar 828
- handhaaf alle aansluitingen

7.3.2 Resultaten Scenario 2

aantal knopen:	86
orde aantal mogelijke verkeersplannen:	10^9
orde aantal uitvoerbare verkeersplannen:	$1.6 * 10^5$

methode	score	rekentijd (seconde) ⁴
optimaal	17514 (99.79%)	36.69
tailor-made (stap 1)	17512 (99.78%)	0.00
tailor-made (stap 2)	17512 (99.78%)	0.00
GAMS (MINOS5)	17508 (99.76%)	0.39
random ⁵	17488 (99.65%)	68.54

Ook hier kost het opbouwen van de graaf ongeveer 0.01 seconde. De optimale oplossing leidt tot de volgende beslissingen:

- vertraag vertrek rit 25723 van 818 naar 823
- vertraag aankomst rit 15737 van 826 naar 827
- vertraag vertrek rit 15737 van 827 naar 831
- vertraag aankomst rit 5725 van 834 naar 835
- vertraag vertrek rit 5725 van 835 naar 836
- verbreek de aansluiting van 25722 op 5823, handhaaf de andere

De beslissingen bij de beste gevonden oplossing door de heuristiek zijn:

- vertraag vertrek rit 25723 van 818 naar 823
- vertraag doorkomst rit 1625 van 825 naar 832

⁴de precisie ligt bij 1 honderdste seconde

⁵de score is het gemiddelde bij duizend herhalingen; beste: 17504, slechtste: 17476

- verhoog aankomst rit 15737 van 826 naar 827
- verhoog vertrek rit 15737 van 827 naar 828
- verhoog aankomst rit 5725 van 834 naar 835
- verhoog vertrek rit 5725 van 835 naar 836
- verbreek de aansluiting van 25722 op 5823, handhaaf de andere

De optimale waarde wordt hier door het tailor-made algoritme niet gevonden. Het gaat hier om het omwisselen van twee treinen. Deze oplossing wordt in de eerste stap niet gevonden omdat bij het zoeken naar een toegelaten oplossing één van deze alternatieven in de tabulijst komt. Ook bij het verbeteren wordt deze oplossing niet gevonden omdat de takwaarde tussen deze twee alternatieven is echter optimaal. Er wordt dus niet gezocht naar een verbetering. Verder geldt voor dit paar treinbewegingen dat de combinatie in de optimale oplossing niet de optimale combinatie voor dit paar is. Bij de optimale oplossing kan echter geen beter uitvoerbaar plan gevonden worden. Uitvoeren van verbeteringsalgoritme *VI* uit tabel 6.1 levert wel de optimale waarde. Dit algoritme kost echter relatief veel tijd (circa 0.7 seconden).

7.3.3 Resultaten Scenario 3

aantal knopen: 424
 orde aantal mogelijke verkeersplannen: 10^{41}

methode	score	rekeningtijd
optimaal ⁶	n.v.t.	n.v.t.
tailor-made (stap 1)	387412 (99.977%)	0.02 sec
tailor-made (stap 2)	387442 (99.985%)	0.05 sec
GAMS (MINOS5)	387406 (99.976%)	ca. 0.5 uur
random ⁷	387167 (99.914%)	ca. 60 uur

Het opbouwen van de graaf, die hier veel groter is dan in de vorige twee scenario's kost hier ongeveer 0.38 seconde. Dit is onderverdeeld in 0.03 seconde voor het kiezen van de alternatieven en 0.35 seconde voor het bepalen van de gewichten.

De beslissingen die genomen zijn door het tailor-made algoritme zijn:

- verhoog vertrek rit 049T1 van 817 naar 819
- verhoog vertrek rit 181H1 van 818 naar 822

⁶de optimale oplossing berekenen is hier natuurlijk niet mogelijk, aangezien de rekeningtijd van de orde 10^{26} jaar is

⁷de score is het gemiddelde bij duizend herhalingen; beste: 387240, slechtste: 387129

- verdraag vertrek rit 148T2 van 818 naar 819
- verdraag vertrek rit 147H3 van 819 naar 822
- verdraag vertrek rit 041H1 van 820 naar 826
- verdraag aankomst rit 147T4 van 822 naar 824
- geef aankomst rit 064T2 route 1671 i.p.v. 1765
- verdraag vertrek rit 006H1 van 824 naar 826
- verdraag vertrek rit 147T4 van 825 naar 826
- verdraag aankomst rit 181T2 van 830 naar 831
- verdraag vertrek rit 003T1 van 830 naar 832
- verdraag vertrek rit 181T2 van 832 naar 833

Het verdragen van rit 181H1 is een voorbeeld van het voorkomen van een inhaalconflict op een uitgaande vrije baan (bereikbaarheid), die door het verbeteringsalgoritme wordt toegevoegd.

7.3.4 Resultaten Scenario 4

aantal knopen: 296
 orde aantal mogelijke verkeersplannen: 10^{34}

methode	score	rekeningijd
optimaal	n.v.t.	n.v.t.
tailor-made (stap 1)	387439 (99.984%)	0.02 sec
tailor-made (stap 2)	387439 (99.984%)	0.05 sec
GAMS (MINOS5)	387439 (99.984%)	40.8 sec
random ^s	387282 (99.944%)	ca. 60 uur

Het opbouwen en vullen van de graaf kost bij dit probleem ongeveer 0.17 seconde.

De beslissingen die genomen zijn door het tailor-made algoritme zijn:

- verdraag vertrek rit 003T1 van 830 naar 842
- verdraag aankomst rit 045T1 van 842 naar 846
- verdraag vertrek rit 045T1 van 845 naar 848

^sde score is het gemiddelde bij honderd herhalingen; beste: 387319, slechtste: 387251

- verbreek de aansluiting van rit 003T1 op 008T1, handhaaf de andere

In dit voorbeeld wordt getoond dat verondersteld wordt dat de diensttijden, zoals ze gebruikt worden door de algoritmes, aangepast zijn aan de volgorde op de bereikbaarheden. In de definitie van het referentiemodel van BASIS wordt er van uitgegaan dat de ritten een voorspelling geven van hun aankomsttijd, waarbij ze uitgaan dat ze niet gehinderd worden door andere ritten. In dit scenario komt rit 003T1 met vertraging aan. De ritten 181T2 en 035T1 komen aan over dezelfde bereikbaarheid. In hun voorspellingen zullen ze geen rekening houden met de vertraging van rit 003T1. Het verkeersregelpunt zal, uit de opgegeven volgorde door het verkeersregelpunt waar de ritten vandaan komen, moeten bepalen wat de werkelijke voorspelde aankomsttijd wordt. In dit scenario wordt ervan uitgegaan dat de volgorde van de treinen is gewisseld. Dit is al aan de orde geweest in paragraaf 3.4.2.

7.4 Conclusie

In dit hoofdstuk is getoond dat het eenvoudige en snelle tailor-made algoritme goede oplossingen vindt voor het maximaal gewogen cliqueprobleem. Voor de scenario's van Utrecht CS is niet duidelijk of de optimale waarde wordt gevonden, maar andere eenvoudige methodes vinden geen betere oplossing in de gegeven graaf, en zijn niet sneller. Bij de scenario's voor Hilversum wordt wel in één van de gevallen de optimale waarde gevonden, in het andere geval niet. Een eenvoudige uitbreiding van de verbeteringsprocedure leidt wel tot het vinden van de optimale waarde, maar kost veel tijd. Gebruik van die verbeterde versie op scenario 4 bijvoorbeeld levert geen betere oplossing maar kost wel meer dan een minuut rekentijd.

Bij presentatie van het tailor-made algoritme aan experts binnen Railned bleek dat zij inderdaad geloven in de werking van dit algoritme en dat er geen duidelijk eenvoudigere en snellere methode te bedenken was.

Voorafgaand aan het algoritme moet de graaf worden opgebouwd. Het waarderen van de knopen en takken kost relatief veel tijd. De helft van de tijd wordt besteed aan het controleren of twee treinbewegingen conflicterende routes hebben. De methode die hiervoor gehanteerd wordt, kijken of de routes secties gemeenschappelijk hebben, is dan ook voor verbetering vatbaar. Ook kan er van tevoren geëvalueerd worden of het wel nodig is te controleren op conflicterende routes. Verder zal bij gebruik van de modellering worden gekeken in hoeverre de graaf of een deel van de graaf 'recyclebaar' is.

Dat er zoveel tijd wordt gebruikt voor het controleren op conflicterende rijwegen geeft wel de hoop dat uitbreiding van de eenvoudige communicatie met de naburige lokale verkeersregelaars naar een meer uitgebreide versie, de rekentijd relatief weinig zal doen toenemen.

Het tailor-made algoritme is simpel, uit te leggen aan niet-wiskundigen en eenvoudig te implementeren. Het meeste werk bij implementatie is ook hier het opbouwen van de graaf en het bepalen van de gewichten. Hiervoor is gedetailleerde informatie over het verkeersregelpunt noodzakelijk. De programmeercode zal voor de verschillende verkeers-

regelpunten grotendeels gelijk zijn. De benodigde gegevens over secties, aansluitingen en verkeersplannen kunnen als databestanden worden toegevoegd.

Hoofdstuk 8

Conclusie

Doelstelling van dit rapport is invulling geven aan het in BASIS geformuleerde begrip lokale verkeersregeling en de bijbehorende conflictsignalering. In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op de vragen zoals die gesteld zijn in de doelstelling.

8.1 Vorm

De eerste vraag die beantwoord diende te worden was welke vorm een verkeersregeling binnen BASIS kan aannemen. Hiervoor is een classificatie gemaakt waarin reeds bestaande en nog te creëren verkeersregelmethodes geplaatst kunnen worden. Kort samengevat zijn er drie klassen te onderscheiden:

- Het sequentieel toepassen van eenvoudige voorrangregels op elk conflict tussen twee treinbewegingen.
- Het voor elk primair conflict afzonderlijk toepassen van een (aantal) handeling(en) die, gelet op de gevolgen de beste oplossing geeft voor het primaire conflict en eventuele volgende conflicten.
- Het creëren van een conflictvrij verkeersplan, waarbij de beste oplossing wordt gezocht voor alle primaire en volgende conflicten.

8.2 Toepasbaarheid

Vervolgens is de vraag welke voorstellen voor een verkeersregeling kansrijk zijn binnen BASIS en onder welke omstandigheden deze verkeersregeling zal functioneren.

In de praktijk van de verkeersleiding en in de literatuur wordt veel aandacht besteed aan beslissingsondersteunende systemen, waarbij de verkeersregelaar een aantal mogelijkheden voorgeschoteld krijgt waarvan hij de, volgens hem, beste kan kiezen. Voor een simulatie moet echter een zelfstandig opererend systeem beschikbaar zijn. Hierbij moet opgemerkt worden dat de verkeersregelmethodes volgens de eerste twee punten in de vorige paragraaf,

waar conflicten sequentieel worden opgelost, een kans op deadlocksituaties hebben. Dit is voor een zelfstandig opererend systeem niet gewenst. De beste kans op slagen zal dus een methode volgens het derde punt hebben.

Een ander punt van aandacht is de toepassing van de verkeersregeling in simulatie. Dit leidt tot veel aandacht aan de snelheid van de methode. Daarom is er in dit rapport voor gekozen de planhorizon, zowel in tijd als geografisch, klein te houden. De verkeersregeling vindt plaats voor elk verkeersregelpunt afzonderlijk, waarbij eenvoudige communicatie plaatsvindt met de naburige verkeersregelpunten om ervoor te zorgen dat, globaal gezien, de oplossing niet te slecht wordt. Ook leidt de snelheid ertoe zeer sterk de structuur van het probleem te gebruiken, waarbij de oplossing dicht in de buurt van de huidige situatie gezocht dient te worden.

8.3 Modelling

In dit rapport is een voorstel gedaan voor de wiskundige modellering van de verkeersregeling bij simulatie en is aandacht besteed aan de oplossingsmethoden.

De verkeersregeling is opgesplitst in twee delen: conflictsignalering en conflictoplossing. Bij conflictsignalering wordt door het lokale verkeersplan de kans van optreden van conflicten bepaald. Als volgens de planregels er sprake is van een conflict, dat wil zeggen dat als de voorspelde situatie inderdaad optreedt er een conflict is, en de kans op dat conflict is groter dan een bepaalde drempelwaarde, dan wordt de lokale verkeersregelaar ingeschakeld die een nieuw uitvoerbaar plan moet maken.

Voor de wiskundige modellering van de conflictoplossing is een graaf gedefinieerd waarbij de knopen een combinatie zijn van een treinbeweging, een tijdstip en een route. Deze knopen zijn alternatieven voor de treinbewegingen in het oorspronkelijke, verstoorte verkeersplan. Knopen die niet samen in het verkeersplan kunnen voorkomen zijn in deze graaf onderling niet verbonden. Tevens wordt in dit rapport met voorbeelden aangegeven hoe er kosten aan de alternatieven kunnen worden gekoppeld en hoe combinaties van alternatieven van twee treinbewegingen kunnen worden gewaardeerd. Bij beide geldt dat de verkeersplannen van naburige verkeersregelpunten een rol spelen.

In deze gewogen graaf moet vervolgens een clique worden gevonden met maximaal gewicht op knopen en takken gezamenlijk. Hierbij wordt aangenomen dat de kosten op de knopen en takken zijn vertaald naar opbrengsten. Deze clique is een uitvoerbaar verkeersplan.

Voor het vinden van een clique van maximaal gewicht is een heuristiek gegeven die eerst zoekt naar een toegelaten oplossing en vervolgens zoekt naar (grote) verbeteringen. Ook zijn er een aantal andere zoekmethodes aangetipt, die ook goed zullen werken, maar waarvan verwacht wordt dat de rekentijd aanzienlijk groter zal zijn.

Zoals reeds opgemerkt hoort de heuristiek bij klasse 3 van de classificatie, zoals eerder in dit hoofdstuk werk aangegeven. Bij het toekennen van gewichten aan de takken en knopen worden over het algemeen gekwantificeerde regels gehanteerd zoals ook in klasse 1 worden gebruikt. Verder geldt dat wanneer de heuristiek wordt toegepast op één primair

conflict, deze heuristiek werkt zoals de methodes in klasse 2.

8.4 Beoordeling

Bij toepassing op verschillende scenario's van twee testinstanties bleek de heuristiek goed en snel te werken. De meeste tijd diende besteed te worden aan het toekennen van gewichten aan de takken en knopen, wat plaats vindt bij het opbouwen van de graaf en dus gebeurt voor alle methodes beschreven in dit rapport.

Bij de kleine testinstantie kon de oplossing van de heuristiek worden vergeleken met de optimale oplossing (volgens enumeratie), bij grote problemen werd zij vergeleken met uitkomsten uit implementatie in GAMS en een random-zoeker. Bij de kleine testinstantie werd één keer het optimum gevonden, de tweede keer niet. Uitbreiding van het verbeteringsalgoritme leverde daarbij wel het optimum. Dit extra zoeken kost echter (onevenredig) meer tijd. Bij de grote testinstantie werd door de andere methodes geen betere oplossing gevonden.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat de verschillende methoden steeds gebruikt zijn op dezelfde graaf. Het is goed mogelijk dat een andere graaf een betere oplossing had bevat.

Bij presentatie van de heuristiek aan experts binnen Railned bleek dat zij inderdaad geloven in de werking van de heuristiek en dat er geen duidelijk eenvoudigere en snellere methode te bedenken was.

8.5 Conclusie en aanbeveling

Indien er aan gedacht wordt simulatie toe te passen op het treinverkeer is het gebruiken van een methode voor verkeersregeling zoals in dit rapport beschreven zeker het overwegen waard. Als de uitkomst van de simulatie geloofwaardig moet zijn, moet ook de verkeersregeling goed worden gemodelleerd. Een toepassing van eenvoudige verkeersregels geeft een zeer lokaal optimum en biedt geen garanties tegen deadlocksituaties.

Bij het gebruik van simulatie dient echter altijd het doel van de simulatie beschouwd te worden. Indien de simulatie wordt gebruikt voor strategische studies, dan is het gebruik van een gedetailleerde verkeersregeling, gezien de grote onzekerheid, niet logisch. Indien een dienstregeling op robuustheid moet worden getest, is een goede verkeersregeling wel van belang.

Bij de gepresenteerde verkeersregeling wordt geprobeerd binnen de mogelijkheden die een beperkte rekentijd geeft, een oplossing te vinden voor de conflicten, terwijl enigszins rekening wordt gehouden met de directe omgeving.

Voor dat wordt overgegaan tot implementatie van het beschreven model dient er aandacht besteed te worden aan een aantal punten. Ten eerste dient opgemerkt te worden dat de modellering, zoals beschreven in dit rapport, een gedetailleerd karakter heeft, tot op rij-

wegniveau. Dit kan veel werk met zich mee brengen. Het zal lonen een slimme manier te vinden om te controleren op rijwegconflicten, aangezien dat een groot deel van de rekentijd vraagt. Verder kan overwogen worden een simpelere methode te hanteren voor de eenvoudigste verkeersregelpunten.

Ten tweede geldt dat de werking van de beschreven modellering sterk afhangt van de gebruikte kostenstructuur. Er kan hierbij gedacht worden aan het uitvoeren van een expertmeningen onderzoek bij vervoerders of verkeersleiders naar kosten van vertragingen, het missen van aansluitingen, het inzetten van extra personeel en materieel en naar de verschillen in kosten tussen de verschillende treinsoorten.

Ten derde geldt dat onderzoek moet worden gedaan naar de mogelijkheden een verkeersregeling zoals hier wordt voorgesteld te koppelen aan de gewenste simulatie-omgeving.

Een laatste punt van aandacht is de communicatie tussen de verkeersregelpunten. In dit rapport is via voorbeelden aangegeven hoe dit kan verlopen. Bij implementatie zal echter nog zorgvuldig overwogen moeten worden hoeveel tijd er voor communicatie beschikbaar is, hoeveel tijd de verschillende methoden kosten en hoe groot de omgeving is die wordt meegenomen. Het lijkt in principe mogelijk de gepresenteerde methode te gebruiken voor een verkeersregelgebied dat bestaat uit meer dan één verkeersregelpunt. De events zijn dan een aankomst of vertrek bij of van een bepaald verkeersregelpunt in dat verkeersregelgebied. Er zal goed moeten worden nagedacht hoe de rijtijden worden verwerkt in de graaf. Deze rijtijden bepalen immers of een combinatie van een vertrek bij een verkeersregelpunt samen kan met een aankomst bij het volgende verkeersregelpunt op de route van die rit. Deze aanpak zal allicht een (globaal) betere oplossing geven. De graaf die hierbij hoort zal echter ook aanmerkelijk groter zijn, en de rekentijd meer dan evenredig veel groter. Het blijft altijd een afweging tussen beschikbare rekentijd en kwaliteit van de oplossing.

Bibliografie

- [1] **Berg J.H.A. van den & Odijk M.A.** DONS: Computer aided design of regular service timetables, Computer in Railway IV, Volume 2, 1994
- [2] **Benson S.J., Ye Y. & Zhang X.** Mixed linear and semidefinite programming for combinatorial and quadratic optimization, University of Iowa, 1998
- [3] **Benson S.J., Ye Y. & Zhang X.** Computational optimization laboratory graph-partition and box-constrained quadratic optimization' User's guide, University of Iowa, 1998
- [4] **Boyce J.F. & Jose R.M.** Application of connectionist local search to multilevel advanced railways conflict resolution and operation control (MARCO), Intern rapport MARCO, King's college London, 1996
- [5] **Carey M. & Kwiecinski A.** Swapping the order of scheduled services to minimize expected costs of delays, Transportation Research-B volume 28B pp409-428, 1994
- [6] **Carey M.** A model and strategy for train pathing with choice of lines, platforms and routes, Transportation Research-B volume 28B pp333-353, 1994
- [7] **Cheng Yu** Optimal train traffic rescheduling simulation by a knowledge-based system combined with critical path method, Simulation Practice and Theory 4 pp.399-413, 1996
- [8] **Eglese R.W.** Simulated Annealing: A tool for Operational Research, European Journal of Operational Research 46 pp.271-281, 1990
- [9] **GAMS development Corporation** GAMS - the solver manuals, 1993
- [10] **Garey M.R. & Johnson D.S.** Computers and Intractability: A guide to the theory of NP-completeness, Freeman, San Francisco, 1979
- [11] **Giessen W. van der, Thieme E., Utberg X. & Weits E.** Rapportage Basis deelproject 3: referentiemodellen, intern rapport, 1997
- [12] **Goemans M.X. & Williamson D.P.** Improved approximation algorithms for maximal cut and satisfiability problems using semidefinite programming, Journal of Assoc. Comput. Mach., 42:1115-1145, 1995

- [13] **Gouweloos M. & Mos R.** Geavanceerde beslissingsondersteuning voor de proces-leider rijwegen, Intern rapport IB/BS/94/MG/001, 1994
- [14] **Gouweloos M. et al.** Systeem/Segment Specificatie van VPT 24e CS/BO, Intern rapport Holland Railconsult, 1995
- [15] **Hertel G. & Steckel J.** Fahrzeitberechnung unter stochastischem Aspekt, Eisenbahningenieur 43-5, 1992
- [16] **Higgins A., Kozan E. & Ferreira L.** Optimal scheduling of trains on a single line track. Transportation Research-B, volume 30 (2), 147-161 1996
- [17] **Jovanovic D. & Harker P.T.** A decision support system for train dispatching: and optimization-based methodology, Journal of the Transportation Research Forum 31:2, pp 25-37, 1990
- [18] **Jurisch B., Kubiak W. & Jozefowska J.** Algorithms for minclique scheduling problems, Discrete Applied Mathematics 72 pp.115-139, 1997
- [19] **Karisch S.E.** CUTSDP a toolbox for a cutting-plan approach based on semidefinite programming, Technical Report IMM-REP-1998-??, Technical University of Denmark, 1998
- [20] **Klerk E. de** Interior point methods for semidefinite programming, Thesis Delft University of Technology, 1997
- [21] **Laarhoven P.J.M. van & Aarts E.H.L.** Simulated Annealing: Theory and Applications, Reidel Publishing Company, Eindhoven, 1988
- [22] **Middelkoop A.D.** Basis, beleid en aanpak van simulatiestudies, Intern rapport Railned, Rnl/705.1/97, 1997
- [23] **Odiijk M.A.** A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables, Transportation Research-B volume 30 pp455-464, 1996
- [24] **Overkamp A.A.F., Schuppen J.H. van & Waal P.R. de** Control of railway traffic, CWI, Amsterdam, 1996
- [25] **Pachl J.** Zum Deadlockproblem bei der automatischen Betriebssteuerung, Signal + Draht (89) 1+2, pp 22-25, 1997
- [26] **Petersen E.R. & Taylor A.J.** Line block prevention in rail line dispatch and simulation models, Infor vol.21 no.1 pp46-51, 1983
- [27] **Petersen E.R., Taylor A.J. & Martland C.D.** An introduction to computer-assisted train dispatch, Journal of Advanced Transportation 20:1, pp 63-72, 1986

- [28] **Phillipson F.** Lokale Treinverkeersleiding, beschrijving implementatie en gebruikershandleiding, Railned Rapport, 1998
- [29] **Ruiter J.M.** Routeren van treinen door stations, uitbreiding van STATIONS. Afstudeerverslag Erasmus Universiteit, Faculteit Economische Wetenschappen, Rotterdam, 1997
- [30] **Satoh N. & Tomii N.** A train traffic simulation system permitting application of knowledge engineering, QR of RTRI, Volume 31, No. 2, 1990
- [31] **Schaefer H. & Pferdmenges S.** An expertsystem for realtime train dispatching, Computer in Railway IV, Volume 2, 1994
- [32] **Schrijver A. & Steenbeek A.** Dienstregelontwikkeling voor Railned, Rapport CADANS 1.0, Rapport Centrum voor Wiskunde en Informatica, 1994
- [33] **Schrijver A.** A course in combinatorial optimization, dictaat a186 TU Delft, 1995
- [34] **Warners J.P.** A nonlinear approach to a class of combinatorial optimization problems, Report 96-119, Faculty of Technical Mathematics, Delft University of Technology, 1996
- [35] **Weigand W.** Verspätungsübertragungen in Fernverkehrsnetzen, ETR 30-12, 1981
- [36] **Weits E.** Simulation of railway traffic control, Intern rapport Railned, 1997
- [37] **Zwaneveld P.J.** Railway planning, routing of trains and allocation of passenger lines, PhD Thesis, Eburon Publishers, 1997

Samenvatting

De organisatie Railned B.V. is opgericht om het gebruik van de Nederlandse railinfrastructuur te optimaliseren, nu en in de toekomst, en om de spoorwegveiligheid in Nederland te bewaken. Bij het optimaal gebruiken van de infrastructuur speelt de 'kwaliteit van het railverkeersproces' een belangrijke rol, er kan hierbij worden gedacht aan begrippen als uitvoerbaarheid, betrouwbaarheid, stabiliteit en punctualiteit. Het beoordelen is tot op heden gebaseerd op gevoel en ervaring, waar een objectieve methode tegenwoordig meer gewenst is. Er is daarom gezocht naar een methode waarmee de dynamische aspecten van het railverkeersproces zichtbaar kunnen worden gemaakt en aangezien analytische methoden (nog) niet beschikbaar zijn, lijkt simulatie het aangewezen gereedschap.

In het voorjaar van 1997 is het simulatieproject BASIS gestart, met als deelnemers de taakorganisaties Railned, NS Railinfrabeheer en NS Verkeersleiding. Het project BASIS levert een handleiding, waarin aangegeven wordt hoe relevante probleemsoorten aangepakt moeten worden om de kans op succesvolle oplossing ervan met behulp van inzet van simulatie zo groot mogelijk te maken. In dit rapport is onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van verkeersregeling binnen BASIS.

De verkeersregeling moet een handleiding geven welke beslissingen moeten worden genomen in geval van conflicten. Er moet hierbij voldoende aandacht worden gegeven aan de volgende drie punten.

Ten eerste is het bij verkeersregeling voor railverkeer een bekend feit dat een verkeersregeling, bestaande uit een aantal op zichzelf goede voorrangregels, toch het gevaar loopt van slechte kwaliteit te zijn, hetzij omdat beslissingen leiden tot onnodig veel vertraging, hetzij omdat beslissingen leiden tot deadlock situaties, waarin treinen op elkaar staan te wachten totdat er van buitenaf ingegrepen wordt.

Een ander probleem is de onzekerheid die bij het treinverkeer een rol speelt. Aangezien rij en halteertijden (sterk) kunnen variëren, is ook het optreden van conflicten aan onzekerheid onderhevig.

Tenslotte moet rekening worden gehouden met de toepassing van de verkeersregeling in simulatie. Dit noopt tot een zeer snelle methode, opdat de simulatie niet te erg wordt vertraagd.

Er is in dit rapport gekozen voor een splitsing van conflictdetectering en conflictoplossing. Bij de conflictdetectering speelt de vraag wanneer een nieuw verkeersplan gemaakt moet

worden. Deze vraag kan simpel beantwoord worden door te kijken naar de kans van optreden van de conflicten. Indien de kans op één van de mogelijke conflicten een drempelwaarde overschrijdt, wordt naar een oplossing gezocht voor een conflictvrij verkeersplan.

Voor de conflictoplossing is gekozen voor een on-line optimaliseringsmethode die, gegeven een verstoorde situatie met conflicten, een conflictvrij verkeersplan creëert voor een verkeersregelpunt (BASIS-notatie voor dienstregelpunt). In de modellering wordt gekozen voor het creëren van een graaf, waarin de knopen trein/route/tijdstip-combinaties zijn. Voor elke treinbeweging in dat verkeersregelpunt binnen de planhorizon worden alternatieven gekozen en gewogen, rekening houdend met de huidige situatie in andere verkeersregelpunten. Ook combinaties van treinbewegingen worden gewogen, waar aansluitingen en conflicten op de vrije baan een rol spelen. In dit rapport wordt met voorbeelden aangegeven hoe de weging van de knopen en takken kan plaatsvinden. In de graaf die nu gecreëerd is, wordt vervolgens gezocht naar een maximaal gewogen clique, een totaal verbonden sub-graaf met maximaal gewicht op takken en knopen.

Het is bekend dat voor dit soort problemen in het algemeen geen optimale oplossing binnen redelijke tijd gevonden kan worden. In verband met de rekentijd is daarom een algoritme ontwikkeld dat zeer snel zoekt naar een conflictvrij verkeersplan en vervolgens zoekt naar grote verbeteringen. Ter vergelijking zijn andere methodes gebruikt, waaronder het oplossen van het bijbehorende kwadratisch programmeringsprobleem met GAMS.

Bijlage A

Railned

In het eerste hoofdstuk van dit rapport is reeds opgemerkt dat de organisatie Railned B.V. twee hoofdtaken heeft. Deze taken zijn bij Railned ondergebracht bij vier afdelingen, ieder met een eigen taak. Deze afdelingen, met hun taken zijn:

- **capaciteitsplanning** In het Structuurschema Verkeer en Vervoer, waarin het overheidsbeleid staat, is een belangrijke rol weggelegd voor railvervoer. De steeds groter wordende mobiliteitsproblemen maken het dringend gewenst om te investeren in uitbreiding van de railcapaciteit voor reizigers- en goederenvervoer als onderdeel van een investeringsprogramma waarvoor de overheid verantwoordelijk is. Daarmee worden de voorwaarden geschapen voor een aanzienlijke verbetering van het totale openbaarvervoerproduct. De vervoerders hebben daarin een belangrijke rol. Zij zijn immers verantwoordelijk voor de exploitatie.

Railned Capaciteitsplanning adviseert de politiek-bestuurlijk verantwoordelijke overheden over de vraag waar welke uitbreidingen van de railcapaciteit het meest noodzakelijk en urgent zijn, gegeven de door de overheid gestelde beleidsprioriteiten. Door het onderhouden van contacten met vervoerders wordt in de adviezen van Capaciteitsplanning ook rekening gehouden met de doelstellingen en wensen van de vervoerszijde. De deskundigheid van Capaciteitsplanning betreft de vertaling van ontwikkelingen in de vervoersmarkt naar prognoses voor het railverkeer en vervolgens naar de daarvoor benodigde railinfracapaciteit, alsmede de benodigde capaciteit van reizigers- en goederenstations. Afstemming van het landelijke railnet op en deels ook integratie met regionaal georiënteerde railsystemen, waarvoor de toenemende congestieproblematiek rond de grote steden met name in de Randstad een belangrijke aanleiding is, krijgt daarbij steeds meer aandacht, evenals de aansluiting op internationale hogesnelheidsnetten.

- **innovatie** De capaciteit van het spoorwegnetwerk bestaat niet. De capaciteit is afhankelijk van de wijze van benutting. Hoeveel treinsoorten moeten met elkaar worden verweven, aan welke kwaliteitseisen moeten ze voldoen en hoe hangen ze met elkaar samen?

Verbeterde methodieken en systemen voor (dienstregeling)planning en verkeersregeling maken het mogelijk om de benutting van het net te vergroten. De ontwikkelingen op het gebied van de informatietechnologie spelen hierbij een belangrijke rol. Ook (verkeers-) technische ingrepen kunnen de benuttingsmogelijkheden verbeteren. Bijvoorbeeld door treinen korter, of sneller achter elkaar, te laten rijden. Het is zaak de ontwikkeling van nieuwe technische systemen op het gebied van sporen, wissels, beveiliging, energievoorziening en materieeltechniek, vanuit de gebruikersbehoefte, goed aan te sturen.

De afdeling Innovatie wil een adviesorgaan en ontwikkelcentrum zijn voor innovaties van railverkeer, gericht op verbeterde benutting van het landelijke railnet.

- **capaciteitstoedeling** Railed Capaciteitstoedeling is de eenheid waar de vervoerder met zijn vragen en wensen terecht kan. Om toegelaten te worden tot het spoorwegnet is een vergunning van de overheid noodzakelijk. Om de veiligheid van het spoorverkeer te waarborgen kunnen met Railed overeenkomsten worden afgesloten die de veiligheidseisen omvatten. Railed Capaciteitstoedeling begeleidt bij het verkrijgen van deze vergunningen.

Gegadigden kunnen niet zomaar 'morgen' rijden. Zo wordt de treinenloop voor reizigersvervoer gepland, op een termijn van minstens één jaar tevoren. Voor goederenvervoer gelden kortere termijnen. Railed zorgt voor een gestroomlijnd capaciteitsplanningsproces, waarin alle partijen hun vervoerswensen kunnen inbrengen. Bij concurrerende wensen wordt eerst in overleg naar alternatieven gezocht. Indien nodig wordt uiteindelijk met behulp van de toedelingsprincipes een keuze gemaakt. Soms kan ook door een aanpassing van de infrastructuur een bepaalde vervoerswens alsnog mogelijk gemaakt worden.

Capaciteitstoedeling coacht dus de totale vervoersplanning voor een bepaald jaar en coördineert ook het werk aan het spoor in diezelfde periode. Anders gezegd: deze afdeling stelt vast wat op enig moment de beschikbare infrastructuur is en wie er wanneer mag rijden. Wanneer een vervoerder meent dat hij niet juist behandeld is in het toedelingsproces, kan arbitrage aangevraagd worden.

- **spoorwegveiligheid** Onder spoorwegveiligheid wordt verstaan het geheel aan regelingen, maatregelen en systemen dat tot doel heeft letsel en schade in het railverkeerssysteem te voorkomen en te beperken.

Railed Spoorwegveiligheid is een onafhankelijke eenheid die zich bezig houdt met beleidsvoorbereiding, normstelling, regelgeving, doorlichting, inspectie en advisering. Tevens leidt Spoorwegveiligheid het onderzoek naar de relatief zwaardere onregelmatigheden (circa 500 per jaar), formuleert aanbevelingen en rapporteert rechtstreeks aan de Minister van Verkeer en Waterstaat.

Naast een centraal deel, zijn er 5 regionale eenheden, in Zwolle, Utrecht, Amsterdam, Rotterdam en Eindhoven. Railed Spoorveiligheid heeft een zeer complete database van onregelmatigheden en ongevallen. Door verworven know-how en door gebruik

te maken van deze database is de afdeling in staat verantwoorde risico-analyses te maken.

De afdeling is ook verantwoordelijk voor het Reglement RailVerkeer (RRV). Dit is het veiligheidsreglement dat geldt voor alle deelnemers aan het railverkeerssysteem. Zij toetst of vervoerders voldoen aan de door Railned te stellen toelatingseisen met betrekking tot de spoorwegveiligheid.

Bron: Informatiebrochure Railned B.V.

Bijlage B

Verkeersplan data

In deze bijlage staan de verkeersplannen weergegeven zoals gebruikt in de testprogramma's. De verklaring van de symbolen in de tabellen is als volgt:

Trein	identificatienummer
B	soort beweging 1 = vertrek 4 = aankomst 5 = doorgaan zonder halteren
pt	tijd volgens oorspronkelijke plan (bv. zoals gepubliceerd in spoorboekje)
dt	voorspelde tijd door rit
soort	soort trein IC = intercity HS = hoge snelheid IR = interregio R = regio G = goederen
spoor 1	beginspoor I/U-spoor voor aankomende treinbeweging perron of tussenspoor voor een vertrekkende treinbeweging
spoor 2	doelspoor (net andersom als bij beginspoor)
route	nummer detailroute
aansluiting	aansluitingen en soort aansluitingen

De verkeersplannen zoals op de volgende bladzijden staan, zijn de oorspronkelijke, uitvoerbare verkeersplannen, waarbij de plantijd en voorspelde tijden aan elkaar gelijk zijn. In het verkeersplan voor Utrecht zijn standaard geen aansluitingen gedefinieerd. In het verkeersplan van Hilversum zijn twee materieelaansluitingen gedefinieerd.

Trein B	pt	dt	soort	spoor 1	spoor 2	route	aansluiting				
004T1	1	800	800	IC	4	Utma_R2	14900	0	0	0	0
041T2	1	800	800	IR	15	Utlr_R1	11824	0	0	0	0
181T1	4	800	800	R	Utva_L3	7	16014	0	0	0	0
128H2	4	801	801	R	UtXX_XX	8	0	0	0	0	0
147H4	4	801	801	R	Utlr_L2	20	14156	0	0	0	0
148T3	4	801	801	R	Utva_R2	18	13685	0	0	0	0
064H2	1	801	801	IR	12A	Uto_L2	3811	0	0	0	0
181T1	1	802	802	R	7	UtXX_XX	0	0	0	0	0
152H2	4	803	803	R	UtXX_XX	1	0	0	0	0	0
040H1	4	803	803	IR	Utlr_L1	9	18755	0	0	0	0
007T1	1	803	803	IC	5	Utlr_R1	15519	0	0	0	0
128H2	1	803	803	R	8	Utva_L2	17076	0	0	0	0
148T3	1	804	804	R	18	Utlr_R2	13300	0	0	0	0
008H1	1	804	804	IC	14	Uto_L2	10581	0	0	0	0
147H4	1	804	804	R	20	Utva_R3	14151	0	0	0	0
411H1	4	804	804	G	Utma_L2	15A	11573	0	0	0	0
411H1	1	804	804	G	15A	Utva_R1	11791	0	0	0	0
035T2	4	805	805	IR	Utva_L3	4	14676	0	0	0	0
152H2	1	805	805	R	1	Uto_R2	5	0	0	0	0
151T1	4	805	805	R	Uto_R1	3	14652	0	0	0	0
147T1	4	807	807	R	Utva_R2	18	13685	0	0	0	0
151T1	1	807	807	R	3	UtXX_XX	0	0	0	0	0
063T2	4	807	807	IR	Uto_L1	11A	1671	0	0	0	0
035H2	4	807	807	IR	Utma_R1	7	16487	0	0	0	0
035T2	1	808	808	IR	4	Utma_R2	14900	0	0	0	0
148H4	4	808	808	R	Utlr_L2	20	14156	0	0	0	0
063T2	1	809	809	IR	11A	UtXX_XX	0	0	0	0	0
053H2	4	809	809	IR	Uto_R1	2	14119	0	0	0	0
147T1	1	810	810	R	18	Utlr_R2	13298	0	0	0	0
182H2	4	810	810	IR	UtXX_XX	8A	0	0	0	0	0
048H1	4	810	810	IR	Utma_R1	15	12501	0	0	0	0
040H1	1	810	810	IR	9	Uto_L2	19228	0	0	0	0
040T1	4	811	811	IR	Uto_L1	5	15410	0	0	0	0
182T2	4	811	811	IR	Utlr_L1	21	14405	0	0	0	0
035H2	1	811	811	IR	7	Utva_L2	16045	0	0	0	0
053H2	1	811	811	IR	2	UtXX_XX	0	0	0	0	0
182H2	1	812	812	IR	8A	Utlr_R1	17274	0	0	0	0
148H4	1	812	812	R	20	Utva_R3	14149	0	0	0	0
128T1	4	813	813	R	Utva_L3	7	16014	0	0	0	0
182T2	1	813	813	IR	21	UtXX_XX	0	0	0	0	0
063H2	4	814	814	IR	UtXX_XX	11A	0	0	0	0	0
148T2	4	814	814	R	Utva_R2	19	13852	0	0	0	0
048H1	1	814	814	IR	15	Utva_R1	11793	0	0	0	0
049T1	4	814	814	IR	Utva_L1	4	14704	0	0	0	0

Figuur B.1: Verkeersplan Utrecht CS 1

040T1	1	814	814	IR	5	Utlr_R1	15519	0	0	0	0
128T1	1	815	815	R	7	UtXX_XX	0	0	0	0	0
181H1	4	816	816	R	UtXX_XX	9	0	0	0	0	0
147H3	4	816	816	R	Utlr_L2	20	14156	0	0	0	0
063H2	1	816	816	IR	11A	Uto_L2	1680	0	0	0	0
144H2	4	817	817	R	UtXX_XX	2	0	0	0	0	0
049T1	1	817	817	IR	4	Utma_R2	14900	0	0	0	0
041H1	4	818	818	IR	Utlr_L1	12	5108	0	0	0	0
180H2	4	818	818	R	UtXX_XX	18	0	0	0	0	0
003H1	4	818	818	HS	Utma_R1	15	12369	0	0	0	0
181H1	1	818	818	R	9	Utva_L2	18561	0	0	0	0
148T2	1	818	818	R	19	Utlr_R2	13915	0	0	0	0
005T1	4	818	818	IC	Utva_L1	8	17103	0	0	0	0
147H3	1	819	819	R	20	Utva_R3	14151	0	0	0	0
144H2	1	819	819	R	2	Uto_R2	14132	0	0	0	0
041H1	1	820	820	IR	12	UtXX_XX	0	0	0	0	0
180H2	1	820	820	R	18	Utma_L1	13462	0	0	0	0
006H1	4	821	821	IC	Utma_R1	14	10614	0	0	0	0
151H2	4	821	821	R	UtXX_XX	1	0	0	0	0	0
003H1	1	821	821	HS	15	Utva_L2	11767	0	0	0	0
147T4	4	822	822	R	Utva_R2	20	14140	0	0	0	0
005T1	1	823	823	IC	8	Utma_R2	17943	0	0	0	0
148H3	4	823	823	R	Utlr_L2	19	13888	0	0	0	0
144T2	4	823	823	R	Uto_R1	2	14119	0	0	0	0
151H2	1	823	823	R	1	Uto_R2	5	0	0	0	0
064T2	4	824	824	IR	Uto_L1	11A	1765	0	0	0	0
006H1	1	824	824	IC	14	Utva_R1	8870	0	0	0	0
003T1	4	825	825	HS	Utva_L3	4	14676	0	0	0	0
147T4	1	825	825	R	20	Utlr_R2	14173	0	0	0	0
144T2	1	825	825	R	2	UtXX_XX	0	0	0	0	0
064T2	1	826	826	IR	11A	UtXX_XX	0	0	0	0	0
053T1	4	826	826	IR	UtXX_XX	1	0	0	0	0	0
008T1	4	827	827	IC	Uto_L1	9	18759	0	0	0	0
413H1	4	827	827	G	Utma_L2	16	12780	0	0	0	0
413H1	1	827	827	G	16	Utva_R1	13155	0	0	0	0
148H3	1	828	828	R	19	Utva_R3	13867	0	0	0	0
041T1	4	828	828	IR	UtXX_XX	15	0	0	0	0	0
053T1	1	828	828	IR	1	Uto_R2	5	0	0	0	0
152T2	4	829	829	R	Uto_R1	3	14652	0	0	0	0
064H1	4	829	829	IR	UtXX_XX	12A	0	0	0	0	0
007H1	4	829	829	IC	Utlr_L1	14	9450	0	0	0	0
128H1	4	830	830	R	UtXX_XX	8	0	0	0	0	0
181T2	4	830	830	R	Utva_L3	7	16014	0	0	0	0
041T1	1	830	830	IR	15	Utlr_R1	11824	0	0	0	0
003T1	1	830	830	HS	4	Utma_R2	14900	0	0	0	0
148T1	4	830	830	R	Utva_R2	18	13685	0	0	0	0

Figuur B.2: Verkeersplan Utrecht CS 2

064H1	1	831	831	IR	12A	Uto_L2	3803	0	0	0	0
147H2	4	831	831	R	Utlr_L2	20	14156	0	0	0	0
180T2	4	831	831	R	Utma_L2	11	1969	0	0	0	0
152T2	1	831	831	R	3	UtXX_XX	0	0	0	0	0
128H1	1	832	832	R	8	Utva_L2	17076	0	0	0	0
181T2	1	832	832	R	7	UtXX_XX	0	0	0	0	0
180T2	1	833	833	R	11	UtXX_XX	0	0	0	0	0
152H1	4	833	833	R	UtXX_XX	1	0	0	0	0	0
045H1	4	833	833	IR	Utlr_L1	5	15386	0	0	0	0
148T1	1	834	834	R	18	Utlr_R2	13298	0	0	0	0
008T1	1	834	834	IC	9	Utlr_R1	18922	0	0	0	0
411T1	4	834	834	G	Utva_L1	15A	11772	0	0	0	0
411T1	1	834	834	G	15A	Utma_L1	11570	0	0	0	0
147H2	1	834	834	R	20	Utva_R3	14151	0	0	0	0
007H1	1	834	834	IC	14	Uto_L2	10581	0	0	0	0
151T2	4	835	835	R	Uto_R1	2	14119	0	0	0	0
035T1	4	835	835	IR	Utva_L3	4	14676	0	0	0	0
152H1	1	835	835	R	1	Uto_R2	5	0	0	0	0
151T2	1	837	837	R	2	UtXX_XX	0	0	0	0	0
147T3	4	837	837	R	Utva_R2	18	13685	0	0	0	0
035H1	4	837	837	IR	Utma_R1	8	17948	0	0	0	0
035T1	1	838	838	IR	4	Utma_R2	14900	0	0	0	0
148H2	4	838	838	R	Utlr_L2	20	14156	0	0	0	0
063T1	4	839	839	IR	Uto_L1	11A	1671	0	0	0	0
045H1	1	839	839	IR	5	Uto_L2	15429	0	0	0	0
053H1	4	839	839	IR	Uto_R1	3	14652	0	0	0	0
049H1	4	840	840	IR	Utma_R1	14	10698	0	0	0	0
182H1	4	840	840	IR	UtXX_XX	9A	0	0	0	0	0
147T3	1	840	840	R	18	Utlr_R2	13298	0	0	0	0
035H1	1	840	840	IR	8	Utva_L2	17076	0	0	0	0
182T1	4	841	841	IR	Utlr_L1	21	14405	0	0	0	0
063T1	1	841	841	IR	11A	UtXX_XX	0	0	0	0	0
053H1	1	841	841	IR	3	UtXX_XX	0	0	0	0	0
182H1	1	842	842	IR	9A	Utlr_R1	18312	0	0	0	0
048T1	4	842	842	IR	Utva_L1	12	3987	0	0	0	0
045T1	4	842	842	IR	Uto_L1	4	14821	0	0	0	0
148H2	1	842	842	R	20	Utva_R3	14149	0	0	0	0
182T1	1	843	843	IR	21	UtXX_XX	0	0	0	0	0
063H1	4	844	844	IR	UtXX_XX	5A	0	0	0	0	0
049H1	1	844	844	IR	14	Utva_R1	8870	0	0	0	0
148T4	4	844	844	R	Utva_R2	19	13852	0	0	0	0
128T2	4	845	845	R	Utva_L3	7	16014	0	0	0	0
048T1	1	845	845	IR	12	Utma_R2	6457	0	0	0	0
045T1	1	845	845	IR	4	Utlr_R1	14908	0	0	0	0
147H1	4	846	846	R	Utlr_L2	20	14156	0	0	0	0
181H2	4	846	846	R	UtXX_XX	9	0	0	0	0	0

Figuur B.3: Verkeersplan Utrecht CS 3

006T1	4	846	846	IC	Utva_L1	8	17103	0	0	0	0
180H1	4	846	846	R	UtXX_XX	18	0	0	0	0	0
063H1	1	846	846	IR	5A	Uto_L2	15194	0	0	0	0
128T2	1	847	847	R	7	UtXX_XX	0	0	0	0	0
148T4	1	847	847	R	19	Utlr_R2	13915	0	0	0	0
004H1	4	847	847	IC	Utma_R1	15	12501	0	0	0	0
181H2	1	848	848	R	9	Utva_L2	18561	0	0	0	0
144H1	4	848	848	R	UtXX_XX	1	0	0	0	0	0
180H1	1	848	848	R	18	Utma_L1	13462	0	0	0	0
041H2	4	849	849	IR	Utlr_L1	14	9450	0	0	0	0
147H1	1	849	849	R	20	Utva_R3	14151	0	0	0	0
144H1	1	850	850	R	1	Uto_R2	5	0	0	0	0
041H2	1	851	851	IR	14	UtXX_XX	0	0	0	0	0
005H1	4	851	851	IC	Utma_R1	12	6270	0	0	0	0
004H1	1	851	851	IC	15	Utva_L2	11767	0	0	0	0
006T1	1	851	851	IC	8	Utma_R2	17943	0	0	0	0
147T2	4	852	852	R	Utva_R2	18	13685	0	0	0	0
151H1	4	852	852	R	UtXX_XX	2	0	0	0	0	0
148H1	4	853	853	R	Utlr_L2	20	14156	0	0	0	0
144T1	4	853	853	R	Uto_R1	3	14652	0	0	0	0
064T1	4	854	854	IR	Uto_L1	9	18759	0	0	0	0
151H1	1	854	854	R	2	Uto_R2	14132	0	0	0	0
413T1	4	854	854	G	Utva_L1	15A	11772	0	0	0	0
413T1	1	854	854	G	15A	Utma_L1	11570	0	0	0	0
147T2	1	855	855	R	18	Utlr_R2	13298	0	0	0	0
005H1	1	855	855	IC	12	Utva_R1	4006	0	0	0	0
144T1	1	855	855	R	3	UtXX_XX	0	0	0	0	0
004T1	4	855	855	IC	Utva_L3	4	14676	0	0	0	0
053T2	4	856	856	IR	UtXX_XX	1	0	0	0	0	0
148H1	1	856	856	R	20	Utva_R3	14151	0	0	0	0
064T1	1	856	856	IR	9	UtXX_XX	0	0	0	0	0
007T1	4	857	857	IC	Uto_L1	5	15410	0	0	0	0
053T2	1	858	858	IR	1	Uto_R2	5	0	0	0	0
041T2	4	858	858	IR	UtXX_XX	15	0	0	0	0	0
152T1	4	859	859	R	Uto_R1	2	14119	0	0	0	0
180T1	4	859	859	R	Utma_L2	19	13954	0	0	0	0
064H2	4	859	859	IR	UtXX_XX	12A	0	0	0	0	0
008H1	4	859	859	IC	Utlr_L1	14	9450	0	0	0	0
152T1	1	901	901	R	2	UtXX_XX	0	0	0	0	0
180T1	1	901	901	R	19	UtXX_XX	0	0	0	0	0

Figuur B.4: Verkeersplan Utrecht CS 4

<i>Trein</i>	<i>B</i>	<i>pt</i>	<i>dt</i>	<i>soort</i>	<i>spoor 1</i>	<i>spoor 2</i>	<i>route</i>	<i>aansluiting</i>			
15710	4	804	804	R	B	1	1	0	0	0	0
15710	1	805	805	R	1	F	10	0	0	0	0
1620	5	807	807	IC	C	A	6	0	0	0	0
21620	5	810	810	IC	C	A	6	0	0	0	0
5823	4	812	812	R	B	2	2	0	0	0	0
25722	4	814	814	R	E	1	9	25723	2	0	0
5823	1	814	814	R	2	D	13	0	0	0	0
5822	4	818	818	R	C	3	7	0	0	0	0
25723	1	818	818	R	1	F	10	0	0	0	0
5822	1	819	819	R	3	A	14	0	0	0	0
21625	5	822	822	IC	B	D	3	0	0	0	0
1625	5	825	825	IC	B	D	3	0	0	0	0
15737	4	826	826	R	E	1	9	0	0	0	0
15737	1	827	827	R	1	A	11	0	0	0	0
5725	4	834	834	R	B	1	1	0	0	0	0
59213	4	834	834	G	C	5A	8	0	0	0	0
5725	1	835	835	R	1	F	10	0	0	0	0
722	5	837	837	IC	C	A	6	0	0	0	0
20722	5	840	840	IC	C	A	6	0	0	0	0
25724	4	844	844	R	E	1	9	25725	2	0	0
15825	4	844	844	R	B	2	2	0	0	0	0
15825	1	845	845	R	2	D	13	0	0	0	0
15824	4	848	848	R	C	3	7	0	0	0	0
25725	1	848	848	R	1	F	10	0	0	0	0
15824	1	849	849	R	3	A	14	0	0	0	0
20727	5	852	852	IC	B	D	3	0	0	0	0
59213	1	852	852	G	5A	A	15	0	0	0	0
727	5	855	855	IC	B	D	3	0	0	0	0
5724	4	856	856	R	E	1	9	0	0	0	0
5724	1	857	857	R	1	A	11	0	0	0	0

Figuur B.5: Verkeersplan Hilversum

Bijlage C

Algoritmes

Tailor-made: zoeken toegelaten oplossing

FUNCTION Los_Eerste_Conflict_OP : BOOLEAN;

BEGIN

 Bepaal_Eerste_conflict(trein1,trein2);

 Klaar:=FALSE;

 FOR i:=Huidige_alternatief[trein1] TO Laatste_alternatief[trein1] DO

 FOR j:=Huidige_alternatief[trein2] TO Laatste_alternatief[trein2] DO

 IF NOT Klaar THEN

 IF (tak(i,j)in graaf) BEGIN

 Huidige_alternatief[trein1]:=i;

 Huidige_alternatief[trein2]:=j;

 IF NOT Conflicten

 THEN Klaar:=TRUE

 ELSE BEGIN

 IF Los_Eerste_Conflict_OP

 THEN Klaar:=TRUE

 ELSE Herstel_oude_oplossing

 END;

 END;

 IF NOT Klaar

 THEN Los_Eerste_Conflict_OP:=FALSE

 ELSE Los_Eerste_Conflict_OP:=TRUE;

END;

Tabel C.1: Tailor-made algoritme in quasi-pascal

Tailor-made: verbeteren

PROCEDURE Verbeter;

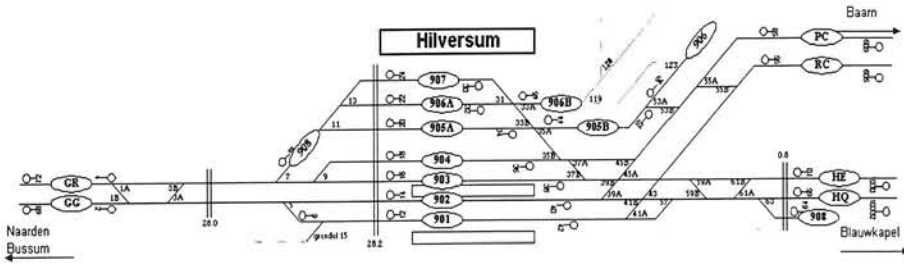
```
BEGIN
  FOR TREIN1:= 1 TO AANTALTREINEN DO BEGIN
    FOR TREIN2:= TREIN1+1 TO AANTALTREINEN DO BEGIN
      IF takwaarde(Huidige.alternatief[Trein1],Huidige.alternatief[trein2])
        <Maximale_Takwaarde THEN BepaalOptimaleCombinatie;

      IF Conflicten
      THEN BEGIN
        IF Los_Eerste_Conflict_ OP
        THEN BEGIN
          IF OudeOplossing > NieuweOplossing
          THEN Herstel_oude_oplossing;
        END;
        ELSE Herstel_oude_oplossing;
      END
      ELSE BEGIN
        IF OudeOplossing > Nieuweoplossing
        THEN Herstel_oude_oplossing;
      END;
    END;
  END;
END;
```

Tabel C.2: Tweede stap Tailor-made algoritme in quasi-pascal

Bijlage D

Detail infrastructuur



Figuur D.1: Detail infra Hilversum (tekenaar: A. Knijpinga)

Bijlage E

Voorbeeldgraaf

In deze bijlage is een graaf uitgewerkt voor scenario 3 van station Utrecht CS.

E.1 Kiezen alternatieven

Het aantal alternatieven dat voor een treinbeweging wordt meegenomen wordt bepaald door het soort conflict waar het bij betrokken is en het soort trein. In de implementatie is gekozen voor de volgende waarden:

- Indien een treinbeweging niet bij een conflict is betrokken en buiten de planhorizon valt, krijgt zij geen alternatieven.
- Indien een treinbeweging niet bij een conflict is betrokken en binnen de planhorizon valt, krijgt zij 3 tijdsalternatieven.
- Indien een treinbeweging een aansluitingsconflict heeft krijgt zij zoveel tijdsalternatieven als nodig is om de aansluiting te behouden, maar minimaal (afhankelijk van soort trein)

Hoge snelheidstrein	5
Intercity	5
Interregionale trein	7
Regionale trein	10
Goederentrein	20

- Indien een treinbeweging een rijwegconflict heeft krijgt zij één alternatieve route, met evenveel tijdsalternatieven als bij het vorige punt.
- Indien een treinbeweging een perronconflict heeft krijgt zij één alternatief perron, met 5 tijdsalternatieven. Ook de bijbehorende vertrekkende treinbeweging krijgt deze.

E.2 Toekennen gewichten

In de implementatie is gekozen voor de het toekennen van gewichten aan de knopen en takken zoals hieronder is weergegeven.

E.2.1 Takgewichten

- Bij een rijwegconflict binnen het verkeersregelpunt tussen twee alternatieven is er geen tak aanwezig.
- Bij een rijwegconflict op de bereikbaarheid na het verkeersregelpunt geldt als bijbehorende kosten twee keer het tekort aan opvolgminuten. (In alle richtingen is een minimale tussentijd van 5 minuten aangehouden.)
- Bij een perronconflict tussen twee alternatieven is er geen tak aanwezig.
- Bij een aansluitingsconflict zijn de kosten afhankelijk van het soort conflict:

reizigers	20
materiaal	geen tak
personeel	10
doorgaande trein	geen tak

E.2.2 Knoopgewichten

- Kosten per minuut vertraging¹ per treinsoort

Hoge snelheidstrein	5
Intercity	4
Interregionale trein	3
Regionale trein	2
Goederentrein	1
- Kosten voor een afwijkende route zijn nul.
- Kosten voor een afwijkend perron zijn 20

E.3 Omrekenen

Vervolgens moeten de kosten naar opbrengsten worden omgerekend om een maximaal gewogen graaf te vinden. Hiervoor wordt de methode uit paragraaf 5.4.4 gebruikt, waarbij als constante $50 - \max\{\max_{j \in V}\{c(j)\}, \max_{kl \in E}\{c(kl)\}\}$ wordt gebruikt (dit is hier overal positief).

¹dit is de extra vertraging die door de bijregeling plaatsvindt

E.4 Alternatieven Scenario 3

opbrengst	trein	tijd	van spoor	naar spoor	route
50	040T1	814	5	Utlr_R1	15519
47	040T1	815	5	Utlr_R1	15519
44	040T1	816	5	Utlr_R1	15519
50	063H2	814	UtXX_XX	11A	0
47	063H2	815	UtXX_XX	11A	0
44	063H2	816	UtXX_XX	11A	0
50	148T2	817	Utva_R2	19	13852
48	148T2	818	Utva_R2	19	13852
46	148T2	819	Utva_R2	19	13852
44	148T2	820	Utva_R2	19	13852
42	148T2	821	Utva_R2	19	13852
40	148T2	822	Utva_R2	19	13852
38	148T2	823	Utva_R2	19	13852
36	148T2	824	Utva_R2	19	13852
34	148T2	825	Utva_R2	19	13852
32	148T2	826	Utva_R2	19	13852
50	048H1	814	15	Utva_R1	11793
47	048H1	815	15	Utva_R1	11793
44	048H1	816	15	Utva_R1	11793
50	049T1	814	Utva_L1	4	14704
47	049T1	815	Utva_L1	4	14704
44	049T1	816	Utva_L1	4	14704
50	128T1	815	7	UtXX_XX	0
48	128T1	816	7	UtXX_XX	0
46	128T1	817	7	UtXX_XX	0
50	181H1	816	UtXX_XX	9	0
48	181H1	817	UtXX_XX	9	0
46	181H1	818	UtXX_XX	9	0
50	147H3	820	Utlr_L2	20	14156
48	147H3	821	Utlr_L2	20	14156
46	147H3	822	Utlr_L2	20	14156
44	147H3	823	Utlr_L2	20	14156
42	147H3	824	Utlr_L2	20	14156
40	147H3	825	Utlr_L2	20	14156
38	147H3	826	Utlr_L2	20	14156
36	147H3	827	Utlr_L2	20	14156
34	147H3	828	Utlr_L2	20	14156

opbrengst	trein	tijd	van spoor	naar spoor	route
32	147H3	829	Utlr_L2	20	14156
50	063H2	816	11A	Uto_L2	1680
47	063H2	817	11A	Uto_L2	1680
44	063H2	818	11A	Uto_L2	1680
50	144H2	817	UtXX_XX	2	0
48	144H2	818	UtXX_XX	2	0
46	144H2	819	UtXX_XX	2	0
50	049T1	817	4	Utma_R2	14900
50	049T1	817	4	Utma_R2	14996
47	049T1	818	4	Utma_R2	14900
47	049T1	818	4	Utma_R2	14996
44	049T1	819	4	Utma_R2	14900
44	049T1	819	4	Utma_R2	14996
41	049T1	820	4	Utma_R2	14900
41	049T1	820	4	Utma_R2	14996
38	049T1	821	4	Utma_R2	14900
38	049T1	821	4	Utma_R2	14996
35	049T1	822	4	Utma_R2	14900
35	049T1	822	4	Utma_R2	14996
32	049T1	823	4	Utma_R2	14900
32	049T1	823	4	Utma_R2	14996
50	041H1	824	Utlr_L1	12	5108
50	041H1	824	Utlr_L1	12	4956
47	041H1	825	Utlr_L1	12	5108
47	041H1	825	Utlr_L1	12	4956
44	041H1	826	Utlr_L1	12	5108
44	041H1	826	Utlr_L1	12	4956
41	041H1	827	Utlr_L1	12	5108
41	041H1	827	Utlr_L1	12	4956
38	041H1	828	Utlr_L1	12	5108
38	041H1	828	Utlr_L1	12	4956
35	041H1	829	Utlr_L1	12	5108
35	041H1	829	Utlr_L1	12	4956
32	041H1	830	Utlr_L1	12	5108
32	041H1	830	Utlr_L1	12	4956
50	180H2	818	UtXX_XX	18	0
48	180H2	819	UtXX_XX	18	0
46	180H2	820	UtXX_XX	18	0

opbrengst	trein	tijd	van spoor	naar spoor	route
50	003H1	818	Utma_R1	15	12369
45	003H1	819	Utma_R1	15	12369
40	003H1	820	Utma_R1	15	12369
50	181H1	818	9	Utva_L2	18561
50	181H1	818	9	Utva_L2	18557
48	181H1	819	9	Utva_L2	18561
48	181H1	819	9	Utva_L2	18557
46	181H1	820	9	Utva_L2	18561
46	181H1	820	9	Utva_L2	18557
44	181H1	821	9	Utva_L2	18561
44	181H1	821	9	Utva_L2	18557
42	181H1	822	9	Utva_L2	18561
42	181H1	822	9	Utva_L2	18557
40	181H1	823	9	Utva_L2	18561
40	181H1	823	9	Utva_L2	18557
38	181H1	824	9	Utva_L2	18561
38	181H1	824	9	Utva_L2	18557
36	181H1	825	9	Utva_L2	18561
36	181H1	825	9	Utva_L2	18557
34	181H1	826	9	Utva_L2	18561
34	181H1	826	9	Utva_L2	18557
32	181H1	827	9	Utva_L2	18561
32	181H1	827	9	Utva_L2	18557
50	148T2	818	19	Utlr_R2	13915
50	148T2	818	19	Utlr_R2	13917
48	148T2	819	19	Utlr_R2	13915
48	148T2	819	19	Utlr_R2	13917
46	148T2	820	19	Utlr_R2	13915
46	148T2	820	19	Utlr_R2	13917
44	148T2	821	19	Utlr_R2	13915
44	148T2	821	19	Utlr_R2	13917
42	148T2	822	19	Utlr_R2	13915
42	148T2	822	19	Utlr_R2	13917
40	148T2	823	19	Utlr_R2	13915
40	148T2	823	19	Utlr_R2	13917
38	148T2	824	19	Utlr_R2	13915
38	148T2	824	19	Utlr_R2	13917
36	148T2	825	19	Utlr_R2	13915

opbrengst	trein	tijd	van spoor	naar spoor	route
36	148T2	825	19	Utlr_R2	13917
34	148T2	826	19	Utlr_R2	13915
34	148T2	826	19	Utlr_R2	13917
32	148T2	827	19	Utlr_R2	13915
32	148T2	827	19	Utlr_R2	13917
50	005T1	818	Utva_L1	8	17103
46	005T1	819	Utva_L1	8	17103
42	005T1	820	Utva_L1	8	17103
50	147H3	820	20	Utva_R3	14151
50	147H3	820	20	Utva_R3	14149
48	147H3	821	20	Utva_R3	14151
48	147H3	821	20	Utva_R3	14149
46	147H3	822	20	Utva_R3	14151
46	147H3	822	20	Utva_R3	14149
44	147H3	823	20	Utva_R3	14151
44	147H3	823	20	Utva_R3	14149
42	147H3	824	20	Utva_R3	14151
42	147H3	824	20	Utva_R3	14149
40	147H3	825	20	Utva_R3	14151
40	147H3	825	20	Utva_R3	14149
38	147H3	826	20	Utva_R3	14151
38	147H3	826	20	Utva_R3	14149
36	147H3	827	20	Utva_R3	14151
36	147H3	827	20	Utva_R3	14149
34	147H3	828	20	Utva_R3	14151
34	147H3	828	20	Utva_R3	14149
32	147H3	829	20	Utva_R3	14151
32	147H3	829	20	Utva_R3	14149
50	144H2	819	2	Uto_R2	14132
48	144H2	820	2	Uto_R2	14132
46	144H2	821	2	Uto_R2	14132
50	041H1	824	12	UtXX_XX	0
47	041H1	825	12	UtXX_XX	0
44	041H1	826	12	UtXX_XX	0
41	041H1	827	12	UtXX_XX	0
38	041H1	828	12	UtXX_XX	0
35	041H1	829	12	UtXX_XX	0
32	041H1	830	12	UtXX_XX	0

opbrengst	trein	tijd	van spoor	naar spoor	route
50	180H2	820	18	Utma_L1	13462
48	180H2	821	18	Utma_L1	13462
46	180H2	822	18	Utma_L1	13462
50	006H1	824	Utma_R1	14	10614
46	006H1	825	Utma_R1	14	10614
42	006H1	826	Utma_R1	14	10614
38	006H1	827	Utma_R1	14	10614
34	006H1	828	Utma_R1	14	10614
50	151H2	821	UtXX_XX	1	0
48	151H2	822	UtXX_XX	1	0
46	151H2	823	UtXX_XX	1	0
50	003H1	821	15	Utva_L2	11767
45	003H1	822	15	Utva_L2	11767
40	003H1	823	15	Utva_L2	11767
50	147T4	822	Utva_R2	20	14140
48	147T4	823	Utva_R2	20	14140
46	147T4	824	Utva_R2	20	14140
50	005T1	823	8	Utma_R2	17943
46	005T1	824	8	Utma_R2	17943
42	005T1	825	8	Utma_R2	17943
50	148H3	823	Utlr_L2	19	13888
48	148H3	824	Utlr_L2	19	13888
46	148H3	825	Utlr_L2	19	13888
50	144T2	823	Uto_R1	2	14119
48	144T2	824	Uto_R1	2	14119
46	144T2	825	Uto_R1	2	14119
50	151H2	823	1	Uto_R2	5
48	151H2	824	1	Uto_R2	5
46	151H2	825	1	Uto_R2	5
50	064T2	824	Uto_L1	11A	1765
50	064T2	824	Uto_L1	11A	1671
47	064T2	825	Uto_L1	11A	1765
47	064T2	825	Uto_L1	11A	1671
44	064T2	826	Uto_L1	11A	1765
44	064T2	826	Uto_L1	11A	1671
41	064T2	827	Uto_L1	11A	1765
41	064T2	827	Uto_L1	11A	1671
38	064T2	828	Uto_L1	11A	1765

opbrengst	trein	tijd	van spoor	naar spoor	route
38	064T2	828	Uto_L1	11A	1671
35	064T2	829	Uto_L1	11A	1765
35	064T2	829	Uto_L1	11A	1671
32	064T2	830	Uto_L1	11A	1765
32	064T2	830	Uto_L1	11A	1671
50	006H1	824	14	Utva_R1	8870
50	006H1	824	14	Utva_R1	8874
46	006H1	825	14	Utva_R1	8870
46	006H1	825	14	Utva_R1	8874
42	006H1	826	14	Utva_R1	8870
42	006H1	826	14	Utva_R1	8874
38	006H1	827	14	Utva_R1	8870
38	006H1	827	14	Utva_R1	8874
34	006H1	828	14	Utva_R1	8870
34	006H1	828	14	Utva_R1	8874
50	003T1	830	Utva_L3	4	14676
50	003T1	830	Utva_L3	4	14682
45	003T1	831	Utva_L3	4	14676
45	003T1	831	Utva_L3	4	14682
40	003T1	832	Utva_L3	4	14676
40	003T1	832	Utva_L3	4	14682
35	003T1	833	Utva_L3	4	14676
35	003T1	833	Utva_L3	4	14682
30	003T1	834	Utva_L3	4	14676
30	003T1	834	Utva_L3	4	14682
50	147T4	825	20	Utlr_R2	14173
50	147T4	825	20	Utlr_R2	14193
48	147T4	826	20	Utlr_R2	14173
48	147T4	826	20	Utlr_R2	14193
46	147T4	827	20	Utlr_R2	14173
46	147T4	827	20	Utlr_R2	14193
44	147T4	828	20	Utlr_R2	14173
44	147T4	828	20	Utlr_R2	14193
42	147T4	829	20	Utlr_R2	14173
42	147T4	829	20	Utlr_R2	14193
40	147T4	830	20	Utlr_R2	14173
40	147T4	830	20	Utlr_R2	14193
38	147T4	831	20	Utlr_R2	14173

opbrengst	trein	tijd	van spoor	naar spoor	route
38	147T4	831	20	Utlr_R2	14193
36	147T4	832	20	Utlr_R2	14173
36	147T4	832	20	Utlr_R2	14193
34	147T4	833	20	Utlr_R2	14173
34	147T4	833	20	Utlr_R2	14193
32	147T4	834	20	Utlr_R2	14173
32	147T4	834	20	Utlr_R2	14193
50	144T2	825	2	UtXX_XX	0
48	144T2	826	2	UtXX_XX	0
46	144T2	827	2	UtXX_XX	0
50	064T2	826	11A	UtXX_XX	0
47	064T2	827	11A	UtXX_XX	0
44	064T2	828	11A	UtXX_XX	0
41	064T2	829	11A	UtXX_XX	0
38	064T2	830	11A	UtXX_XX	0
35	064T2	831	11A	UtXX_XX	0
32	064T2	832	11A	UtXX_XX	0
50	053T1	826	UtXX_XX	1	0
47	053T1	827	UtXX_XX	1	0
44	053T1	828	UtXX_XX	1	0
50	008T1	827	Uto_L1	9	18759
46	008T1	828	Uto_L1	9	18759
42	008T1	829	Uto_L1	9	18759
50	413H1	827	Utma_L2	16	12780
49	413H1	828	Utma_L2	16	12780
48	413H1	829	Utma_L2	16	12780
50	413H1	827	16	Utva_R1	13155
49	413H1	828	16	Utva_R1	13155
48	413H1	829	16	Utva_R1	13155
50	148H3	828	19	Utva_R3	13867
48	148H3	829	19	Utva_R3	13867
46	148H3	830	19	Utva_R3	13867
50	041T1	828	UtXX_XX	15	0
47	041T1	829	UtXX_XX	15	0
44	041T1	830	UtXX_XX	15	0
50	053T1	828	1	Uto_R2	5
47	053T1	829	1	Uto_R2	5
44	053T1	830	1	Uto_R2	5

opbrengst	trein	tijd	van spoor	naar spoor	route
50	152T2	829	Uto_R1	3	14652
48	152T2	830	Uto_R1	3	14652
46	152T2	831	Uto_R1	3	14652
50	064H1	829	UtXX_XX	12A	0
47	064H1	830	UtXX_XX	12A	0
44	064H1	831	UtXX_XX	12A	0
50	007H1	829	Utr_L1	14	9450
46	007H1	830	Utr_L1	14	9450
42	007H1	831	Utr_L1	14	9450
50	128H1	830	UtXX_XX	8	0
49	128H1	831	UtXX_XX	8	0
48	128H1	832	UtXX_XX	8	0
50	181T2	830	Utva_L3	7	16014
50	181T2	830	Utva_L3	7	16020
48	181T2	831	Utva_L3	7	16014
48	181T2	831	Utva_L3	7	16020
46	181T2	832	Utva_L3	7	16014
46	181T2	832	Utva_L3	7	16020
44	181T2	833	Utva_L3	7	16014
44	181T2	833	Utva_L3	7	16020
42	181T2	834	Utva_L3	7	16014
42	181T2	834	Utva_L3	7	16020
40	181T2	835	Utva_L3	7	16014
40	181T2	835	Utva_L3	7	16020
38	181T2	836	Utva_L3	7	16014
38	181T2	836	Utva_L3	7	16020
36	181T2	837	Utva_L3	7	16014
36	181T2	837	Utva_L3	7	16020
34	181T2	838	Utva_L3	7	16014
34	181T2	838	Utva_L3	7	16020
32	181T2	839	Utva_L3	7	16014
32	181T2	839	Utva_L3	7	16020
50	041T1	830	15	Utr_R1	11824
47	041T1	831	15	Utr_R1	11824
44	041T1	832	15	Utr_R1	11824
50	003T1	830	4	Utma_R2	14900
50	003T1	830	4	Utma_R2	14996
45	003T1	831	4	Utma_R2	14900

opbrengst	trein	tijd	van spoor	naar spoor	route
45	003T1	831	4	Utma_R2	14996
40	003T1	832	4	Utma_R2	14900
40	003T1	832	4	Utma_R2	14996
35	003T1	833	4	Utma_R2	14900
35	003T1	833	4	Utma_R2	14996
30	003T1	834	4	Utma_R2	14900
30	003T1	834	4	Utma_R2	14996
50	148T1	830	Utva_R2	18	13685
48	148T1	831	Utva_R2	18	13685
46	148T1	832	Utva_R2	18	13685
50	064H1	831	12A	Uto.L2	3803
47	064H1	832	12A	Uto.L2	3803
44	064H1	833	12A	Uto.L2	3803
50	147H2	831	Utlr_L2	20	14156
48	147H2	832	Utlr_L2	20	14156
46	147H2	833	Utlr_L2	20	14156
50	180T2	831	Utma_L2	11	1969
48	180T2	832	Utma_L2	11	1969
46	180T2	833	Utma_L2	11	1969
50	152T2	831	3	UtXX_XX	0
48	152T2	832	3	UtXX_XX	0
46	152T2	833	3	UtXX_XX	0
50	128H1	832	8	Utva_L2	17076
49	128H1	833	8	Utva_L2	17076
48	128H1	834	8	Utva_L2	17076
50	181T2	832	7	UtXX_XX	0
48	181T2	833	7	UtXX_XX	0
46	181T2	834	7	UtXX_XX	0
44	181T2	835	7	UtXX_XX	0
42	181T2	836	7	UtXX_XX	0
40	181T2	837	7	UtXX_XX	0
38	181T2	838	7	UtXX_XX	0
36	181T2	839	7	UtXX_XX	0
34	181T2	840	7	UtXX_XX	0
32	181T2	841	7	UtXX_XX	0
50	180T2	833	11	UtXX_XX	0
48	180T2	834	11	UtXX_XX	0
46	180T2	835	11	UtXX_XX	0

opbrengst	trein	tijd	van spoor	naar spoor	route
50	152H1	833	UtXX_XX	1	0
48	152H1	834	UtXX_XX	1	0
46	152H1	835	UtXX_XX	1	0
50	045H1	833	Utlr_L1	5	15386
47	045H1	834	Utlr_L1	5	15386
44	045H1	835	Utlr_L1	5	15386
50	148T1	834	18	Utlr_R2	13298
48	148T1	835	18	Utlr_R2	13298
46	148T1	836	18	Utlr_R2	13298
50	008T1	834	9	Utlr_R1	18922
46	008T1	835	9	Utlr_R1	18922
42	008T1	836	9	Utlr_R1	18922
50	411T1	834	Utva_L1	15A	11772
49	411T1	835	Utva_L1	15A	11772
48	411T1	836	Utva_L1	15A	11772
50	411T1	834	15A	Utma_L1	11570
49	411T1	835	15A	Utma_L1	11570
48	411T1	836	15A	Utma_L1	11570
50	147H2	834	20	Utva_R3	14151
48	147H2	835	20	Utva_R3	14151
46	147H2	836	20	Utva_R3	14151
50	007H1	834	14	Uto_L2	10581
46	007H1	835	14	Uto_L2	10581
42	007H1	836	14	Uto_L2	10581
50	151T2	835	Uto_R1	2	14119
50	035T1	835	Utva_L3	4	14676
50	152H1	835	1	Uto_R2	5
50	151T2	837	2	UtXX_XX	0
50	147T3	837	Utva_R2	18	13685
50	035H1	837	Utma_R1	8	17948
50	035T1	838	4	Utma_R2	14900
50	148H2	838	Utlr_L2	20	14156
50	063T1	839	Uto_L1	11A	1671
50	045H1	839	5	Uto_L2	15429
50	053H1	839	Uto_R1	3	14652
50	049H1	840	Utma_R1	14	10698
50	182H1	840	UtXX_XX	9A	0
50	147T3	840	18	Utlr_R2	13298

opbrengst	trein	tijd	van spoor	naar spoor	route
50	035H1	840	8	Utva_L2	17076
50	182T1	841	Utlr_L1	21	14405
50	063T1	841	11A	UtXX_XX	0
50	053H1	841	3	UtXX_XX	0
50	182H1	842	9A	Utlr_R1	18312
50	048T1	842	Utva_L1	12	3987
50	045T1	842	Uto_L1	4	14821
50	148H2	842	20	Utva_R3	14149
50	182T1	843	21	UtXX_XX	0
50	063H1	844	UtXX_XX	5A	0
50	049H1	844	14	Utva_R1	8870
50	148T4	844	Utva_R2	19	13852
50	128T2	845	Utva_L3	7	16014
50	045T1	845	4	Utlr_R1	14908
50	048T1	845	12	Utma_R2	6457
50	147H1	846	Utlr_L2	20	14156
50	181H2	846	UtXX_XX	9	0
50	006T1	846	Utva_L1	8	17103
50	180H1	846	UtXX_XX	18	0
50	063H1	846	5A	Uto_L2	15194
50	128T2	847	7	UtXX_XX	0
50	148T4	847	19	Utlr_R2	13915
50	004H1	847	Utma_R1	15	12501
50	181H2	848	9	Utva_L2	18561
50	144H1	848	UtXX_XX	1	0
50	180H1	848	18	Utma_L1	13462
50	147H1	849	20	Utva_R3	14151
50	041H2	849	Utlr_L1	14	9450
50	144H1	850	1	Uto_R2	5
50	005H1	851	Utma_R1	12	6270
50	004H1	851	15	Utva_L2	11767
50	006T1	851	8	Utma_R2	17943
50	041H2	851	14	UtXX_XX	0
50	147T2	852	Utva_R2	18	13685
50	151H1	852	UtXX_XX	2	0
50	148H1	853	Utlr_L2	20	14156
50	144T1	853	Uto_R1	3	14652

opbrengst	trein	tijd	van spoor	naar spoor	route
50	064T1	854	Uto_L1	9	18759
50	151H1	854	2	Uto_R2	14132
50	413T1	854	Utva_L1	15A	11772
50	413T1	854	15A	Utma_L1	11570
50	147T2	855	18	Utlr_R2	13298
50	005H1	855	12	Utva_R1	4006
50	144T1	855	3	UtXX_XX	0
50	004T1	855	Utva_L3	4	14676

De takwaarden worden hier niet vermeld, aangezien dat er erg veel zijn.

Summary in English

This report is the product of the project the author carried out in the second year of the post-MSc course 'Mathematical Design Engineering' at Delft University of Technology. It addresses the problem of recreating a timetable for a railway operator if there are disturbances that lead to conflicts in the original traffic plan. The project was carried out in co-operation with Railned.

Introduction

Because the Dutch railway was privatised in 1994, the use of the railway infrastructure was to be governed by an independent organisation, for which purpose Railned was founded. Railned works under the authority of the Ministry of Public Transport, and is independent of all the users of the Dutch railway infrastructure. Railned is responsible for the planning and the management of the railway infrastructure. Management comprises optimising the use and guaranteeing the security of the Dutch railway infrastructure, now and in the future

In the spring of 1997 Railned Innovation started the simulation project BASIS. Simulation is a good tool for determining the quality of the rail traffic process, and has been used for several years now. However, realisation and evaluation of simulation studies is toilsome. The goal of BASIS is to provide guidelines for how relevant problems have to be handled, and to maximise the probability of solving them successfully with simulation.

One of the most important aspects of simulating rail-traffic is traffic control. It is well known that priority rules that work well independently can show very poor results if used together for traffic control. The aim of this project is to design a conflict detection and resolution tool that works very fast and has a high level of detail (the routing through stations has to be considered as well).

Literature

In literature much attention has been paid to (semi-) automatic (real-time) train dispatching. In the United States and Australia most of the work concerns long distance,

single-track line problems (mainly of freight trains). Here the main task of the traffic controller is to control the movement of trains over a line, including the planning of where meets of trains going in opposite directions and overtakes are to occur and the aligning of the switches to control each train movement. See for this kind of problems the articles of Jovanovic & Harker [17], Petersen, Taylor & Martland [27] and Higgins, Kozan & Ferreira[16]. In the Netherlands, however, the situation is a multi-track, short distance and much used railway network, mostly used by passenger trains.

Techniques that are used for the train dispatching and train pathing vary. The application of Expert Systems and Knowledge Engineering is described in Tomii & Satoh [30] and Schaefer & Pferdmenges [31]; Knowledge-Based systems in combination with simulation for dispatching can be found in Cheng [7]. Analytical techniques can be found in Overkamp, Schuppen & de Waal [24], several articles from Carey, e.g. [5, 6] and in the MARCO-project[4]. The MARCO-project (Multilevel Advanced Railways Conflict resolution and Operational control) designs conflict detection and resolution tools that use neural networks and MIP-models for a train traffic network.

Articles that deal with line block (or deadlock) prevention are those of Petersen & Taylor [26] and Pachl [25].

Traffic control

The aim of this project is to design a traffic-control algorithm that creates a performable traffic plan when normal schedules are somehow disturbed. The algorithm has to handle the uncertainty of the train traffic and, for the use in simulation, it has to be very fast. To model train traffic, divide the rail network into traffic control points and their connections. To control calculation time, the traffic control is executed for each traffic control point separately. Those points can vary between big stations (like Utrecht CS²) and railway junctions where just two (multi) tracks converge (or diverge). In analysing the problem, only the worst case situation (big stations) will be considered. A traffic control model that can handle big stations is assumed to handle junctions as well. The traffic control points are connected by tracks that allow no changes in the order of the trains.

The traffic controller of such a traffic control point has no duties until some disturbance occurs. Such disturbances can lead to conflicts in the original timetable. Examples of conflicts that will be considered are³:

- track occupation conflicts: two trains want to use the same track section at the same time.
- connection conflicts: a train runs late; to retain its connection to a second train, this second train has to wait.

²the railway station Utrecht CS is the busiest railway station in the Netherlands and is visited by over 100 trains per hour in peak hours

³these conflicts can be found in Schaefer[31]

- schedule conflicts: the actual arrival time of the train deviates significantly from the time in the original timetable.
- roster conflicts: the same engine, cars, or staff have been assigned to two trains. If the first train is late, the second is also delayed, or new equipment or staff has to be assigned to it.

In those cases a new traffic plan has to be created. This schedule has to be as close as possible to the original timetable. However, if a conflict is detected that lies in the future, it is not sure at all that the conflict will actually happen. This is because there is some variance in the predicted arrival times of the trains. Therefore two main questions are distinguished in this project:

- When must the decision be made to make a new traffic plan?
- What techniques must be used to create the new traffic plan?

Conflict probability

To determine the moment the traffic plan has to be revised, we investigate the probability of a certain conflict taking place. We do not want to search for a solution to a conflict, and then see that the conflict doesn't occur. The probability that the revision is made unnecessarily has to be minimised. Two main conflicts have to be considered:

- track occupation conflict: the time intervals of two trains claiming a certain track overlap. These conflicts are called 'hard conflicts'.
- connection conflict: the arrival time of one train is later than the scheduled departure time of another train, and the trains have a connection, or the same engine, cars or staff have been assigned to them. These conflicts are called 'soft conflicts'.

Define the stochastic variables: A_i the arrival time of train i , V_j the departure time of train j and H_{ij} the changing time or turn-around time between train i and j .

Define further $f_X(\cdot)$ and $F_X(\cdot)$, the density function and distribution function of a stochastic variable X , and an insecurity parameter t , for example the time between the prediction of the arrival time and the predicted arrival time. The scheduled departure time of train j will be denoted by v_j . The prediction of the arrival time of a train depends on t . A way to do this is to make the standard deviation a function of t . For example, when the arrival time is distributed normally, you can take the parameter $\sigma = c\sqrt{t}$, where c is a constant.

Now everything is ready to calculate the conflict probabilities. A physical conflict⁴ triggers the making of a new traffic plan when the conflict probability exceeds a certain threshold value.

⁴it could be possible that two trains have no physical conflict if the conflict probability of those trains exceeds a threshold; this situation does not trigger the making of a new traffic plan

Track occupation conflict

Two trains arriving simultaneously

Two trains arrive at a traffic control point and claim the same track for some time. The minimum headway time between train i and j is τ_{ij} if train i comes first. There is a conflict when train j wants to ride the track before time $A_i + \tau_{ij}$. The conflict probability is

$$\begin{aligned} P(\text{conflict}) &= P(-\tau_{21} \leq A_2 - A_1 \leq \tau_{12}|t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} (F_{A_2}(a + \tau_{12}|t) - F_{A_2}(a - \tau_{21}|t)) f_{A_1}(a|t) da \end{aligned}$$

Two trains departing simultaneously

If two trains depart from a traffic control point the conflict probability is

$$P(\text{conflict}) = P(-\tau_{21} \leq V_2 - V_1 \leq \tau_{12}|t)$$

One train departing, one train arriving

One train departs from the traffic control point and uses the same track as an arriving train. The minimum headway time is τ_{av} if the arriving train uses the track first. The conflict probability can be defined as

$$\begin{aligned} P(\text{conflict}|t) &= P(A \leq V \leq A + \tau_{av}|t, A \leq V) + P(V < A \leq V + \tau_{va}|t, V < A) \\ &= P(V - \tau_{av} \leq A \leq V|t, A \leq V) + P(V < A \leq V + \tau_{va}|t, V < A) \\ &= P(V - \tau_{av} \leq A \leq V + \tau_{va}|t) \end{aligned}$$

Connection conflict

When there is a connection defined between two trains, the conflict probability is the probability that the arrival time of the first train (plus change or turn-around time) is later than departure time of the other train:

$$\begin{aligned} P(\text{conflict}) &= P(A_i + H_{ij} > V_j|t) \\ &= \int_0^{\infty} \int_{v_j}^{\infty} (1 - F_A(v - h|t)) f_{H_{ij}}(h) f_{V_j}(v|t) dv dh. \end{aligned}$$

Modelling recreation traffic plan

The traffic plan can be considered as a graph $G = (V, E)$. The vertices are events, which consist of a train movement⁵, a path and a time. Two vertices are connected when the

⁵trainnumber, departure or arrival and a point on the edge of the traffic control point

events do not have a hard (track occupation) conflict. A train that enters and leaves a traffic control point has a vertex for each movement. If there are conflicts in the traffic plan, alternative events are added, with different times or paths (a different platform gives a different path). The vertices for a specific train movement are not connected.

The graph now exists of layers of alternative events for each movement of the trains. The problem is to find a combination of vertices (one from each layer) that are all connected to one another. This is a clique, a subset C of V such that u and v are connected for any two $u, v \in C$. Special in this case is that the clique number is known (the number of train movements to be scheduled).

Some alternatives are better than others. For this reason define the weight function as $g : V \rightarrow \mathbb{R}$. The weights of vertices of outgoing trains are partly determined by the traffic control points that are the destination of that train. These weights are based on the expected arrival time at the next point(s). The traffic control point itself determines the weights of the vertices that represent incoming and outgoing trains, based on the choice of time and path of those vertices.

There could also be a preference for a combination of two vertices. For example, it is not practical if an express train starts just behind a slow train and also soft (connection and roster) conflicts result in a weight on the edges between the vertices that result in that conflict. So we have the weight function $w : E \rightarrow \mathbb{R}$. When the clique number is known, as in this problem, the vertex weight can be put on the edges.

If there are m train movements to be scheduled, the problem is to find a clique of size m with maximal weight:

$$\max w(C) = \max \left(\sum_{e_{vw} \in E(C)} w(e_{vw}) + \sum_{v \in V(C)} g(v) \right).$$

Let $x = \{0, 1\}^n$ denote the clique indicator vector with $x_i = 1$ if vertex i is in the clique. The max-clique problem can be written as the quadratic optimisation problem (here the vertex weight is put on the edges):

$$\max \left\{ \frac{1}{2} x^T W x : \sum_{i=1}^n x_i = m, x_i \in \{0, 1\}, \sum_{i \in \mathcal{A}_k} x_i = 1 \quad k = 1, \dots, m \right\}$$

where \mathcal{A}_k is the set of alternatives for train movement k .

Solving Maximum Weighted Clique problem

For solving the maximum clique problem several methods can be used. For example GAMS can be used to solve the quadratic programming problem with DICOPT, or the linearised problem with CPLEX. DICOPT does not guarantee the optimal solution because there are a great number of local optima. Both methods however are expected to be too time consuming. The quadratic programming problem can also be formulated as a semidefinite

programming problem and solved by methods using interior point techniques. The problem here is to find appropriate techniques for rounding the solution.

In Jurisch[18] a method is presented for finding a minimum weighted clique in a graph, using a spectral algorithm. This method is likely to produce solutions that are not local optima. Improvements can be made by simple improvement procedures. These improvement procedures can be used alone as well. A few of these methods are:

- Descent/Ascent method, like the Gradient method, see for example Warners [34].
- Simulated Annealing, see for example Eglese [8].
- Tailor-made algorithms that use the special features of the problem. An example will be treated later.

Tailor made algorithm

The Tailor made algorithm for finding a maximum-weighted clique is a type of local search. First the graph is sorted such that horizontally the vertices in each layer are sorted in decreasing vertex weight. Now the best clique will be at the left side of the graph, if only the vertex weights are considered. This simple form of local search starts with an initial solution, which is the representation of the current traffic plan.

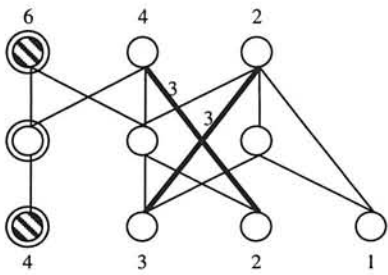
Searching a solution to the first hard conflict in the current situation then generates a neighbour of this situation. Two solutions to this conflict are considered: the first solution found if the weight of the vertex of the first train movement is kept as high as possible and the first solution found if the weight of the vertex of the second train movement is kept as high as possible. The best of these two solutions is chosen in the new solution. This solution can have second-order conflicts. This search is repeated for the other (first and second order) hard conflicts, until a hard-conflict-free plan is created (a clique is found).

Next, the solution is improved by searching for a better solution for each pair of train-movements where the edge weight is not optimal⁶. If this solution gives new conflicts these must be solved, and the new clique has to have a higher value. A better solution for each pair of train movements could also be searched for, but this costs a lot more time, whereas the solution only gets a little bit better.

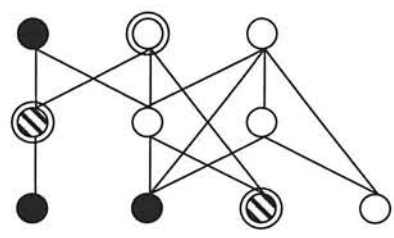
Keeping a tabu-list with combinations of vertices that are not allowed again in the solution prevents cycling and thus guarantees that the algorithm is finite. Three types of tabu-lists are possible:

- a list of combinations of vertices that have formed a conflict in the solution.
- a list of vertices that have been in a conflict.
- a list of vertices that have been used already in the algorithm.

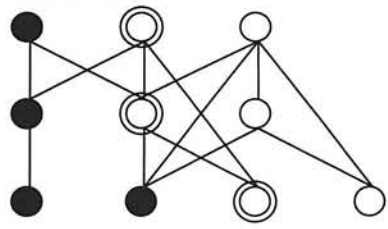
⁶there is some cost caused by this combination of train movements, e.g. soft conflicts



a) current situation and the two solutions to the first conflict with values 9 and 8



b) new situation results in one new conflict



c) solution to conflict results in clique

- = alternative for the train movements
- ⊙ = alternative in the current solution
- = alternative in the tabu-list
- ⊘ = alternative that is part of a conflict

Figuur F.1: Example algorithm

Results

There are two test instances created: one for station Hilversum and one for station Utrecht Central. In rush hour Hilversum has approximately 30 train movements an hour, and Utrecht Central 170. For each test instance two scenarios are treated. The results⁷ can be found in Table F.1. The optimal-weighted clique follows from enumerating all the possibilities. From the weight function the maximal possible weight can be derived⁸: 17500 for Hilversum and 387500 for Utrecht CS.

Conclusion

When there is a need for train traffic control in simulation, the use of a method as described in this report is worth considering. Simple priority rules give a local optimum and can

⁷the test program was run on a PC with a PII-266MHz processor
⁸this value is a upper-bound

	Hilversum		Utrecht CS	
	89	86	424	296
number of nodes	89	86	424	296
time to built graph	0.01 sec	0.01 sec	0.38 sec	0.17 sec
time to find clique	<0.01 sec	<0.01 sec	0.02 sec	0.02 sec
time to improve clique	<0.01 sec	<0.01 sec	0.05 sec	0.05 sec
total weight clique	17544	17512	387442	387439
optimal weight clique	17544	17514	unknown	unknown

Tabel F.1: Results

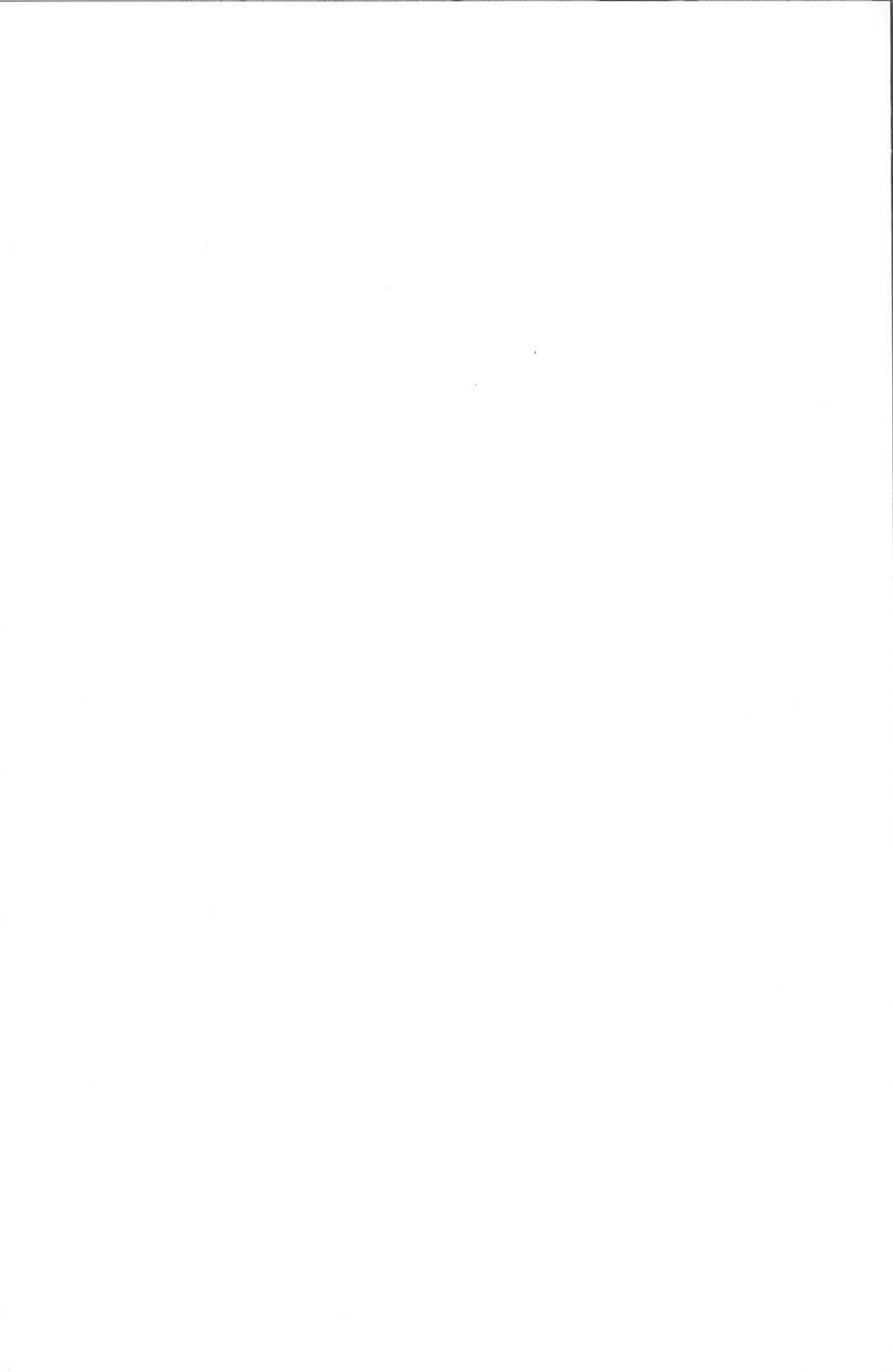
result in deadlock situations. Network optimisation costs too much time to be used in simulation. The model presented in this report gives a near-optimal local traffic plan fast, and the consequences of this traffic plan for the environment of this traffic control point have been taken into account. When implementing this method, special attention has to be paid to the weights on the vertices and edges of the graph. With these weights the impact of the environment and several scenarios for priority rules can be modelled.

Curriculum Vitae

De auteur van dit rapport, Frank Phillipson, werd geboren op 28 augustus 1973 te Purmerend. Na het doorlopen van de lagere school ('de Flierefluit') en middelbare school ('KSG Jerusalem') in Venray, begon hij in 1991 aan de studie Econometrie aan de Vrije Universiteit te Amsterdam. De doctoraalscriptie ter voltooiing van deze opleiding, in de afstudeer richting Besliskunde, werd geschreven bij de afdeling Research & Development van ASZ, onderdeel van de GAK-Groep, te Amsterdam. De titel van deze scriptie luidde: 'Simulatie van bedrijfsprocessen bij het experimentele districtkantoor Almere van de GAK-Groep' en behelsde de modellering en simulatie van het logistieke traject dat een uitkeringsaanvraag bij een GAK-districtskantoor doorloopt.

In september 1996 begon hij met de postdoctorale ontwerpersopleiding 'Wiskundige beheers- en beleidsmodellen' bij de vakgroep Statistiek, Stochastiek en Operations Research van de Technische Universiteit Delft. Het eerste jaar van deze opleiding bestond uit het volgen van cursussen, het tweede jaar uit een project, uitgevoerd bij Railned B.V. afdeling Innovatie te Utrecht. Dit project over verkeersregeling bij simulatie van het treinverkeer vormde de basis voor dit rapport.

Vanaf 1 september 1998 werkt de auteur van dit rapport als technisch wetenschappelijk onderzoeker bij de afdeling Planning, Performance en Reliability van KPN-Research.



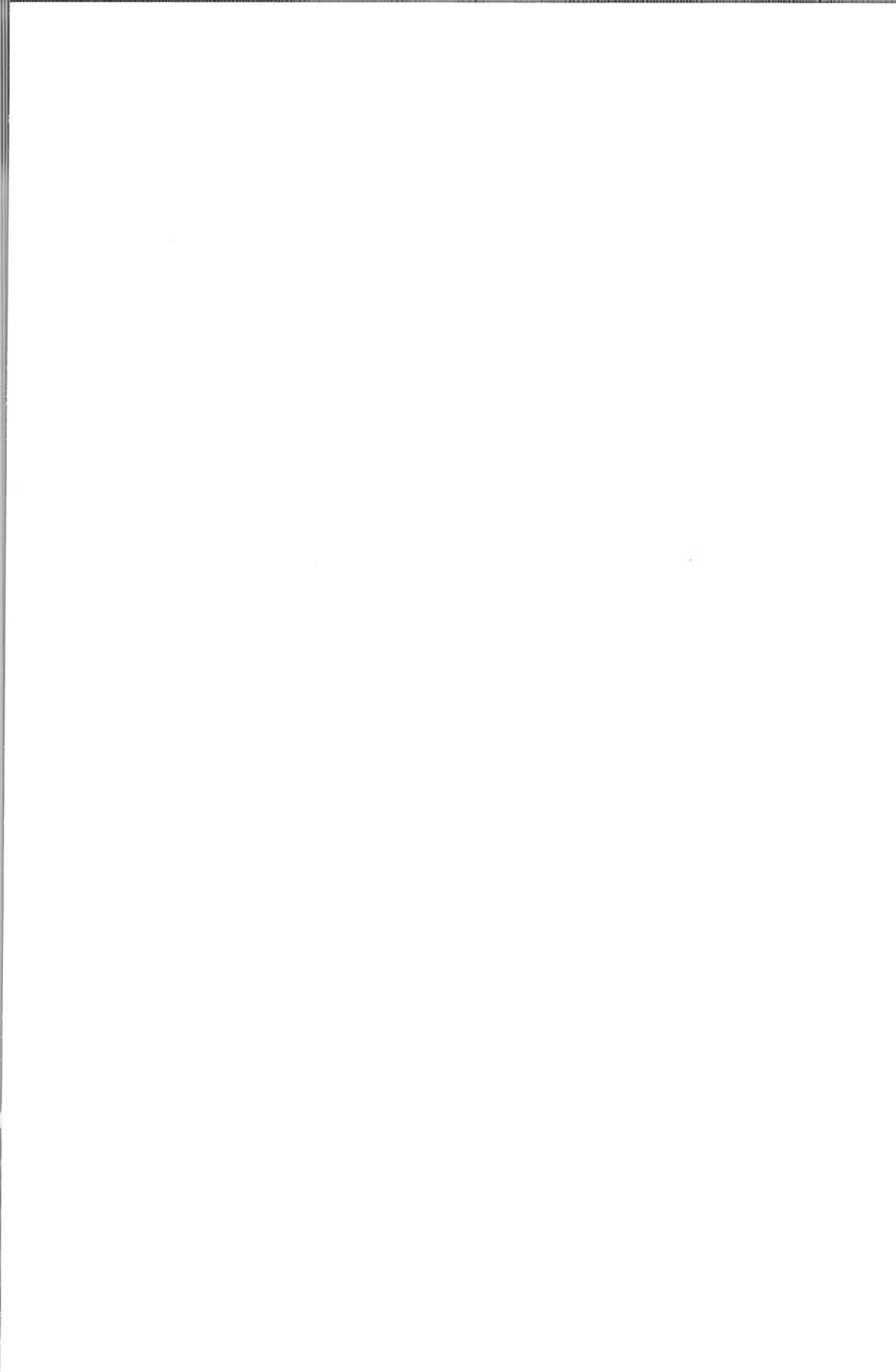
The following reports appeared in the WBBM Report Series:

- 1 W. Osman, A Design of an MSS for Integrated Program & Project Management
- 2 J.J. de Jonge, Maintenance Management and Modelling
- 3 B. Meima, Expert Opinion and Space Debris
- 4 K. Wouterse, Design of a Management Supporting System for Distributed Production Planning
- 5 P.J.M. Waasdorp, Forecasting and Inventory Replenishment in a Distribution Chain
- 6 R.A.L. Slaats, Planningsalgoritmes voor MRP
- 7 H.C. Vos, A Multi-Component Maintenance Model with Discounts
- 8 G. Dijkhuizen, Inventory Management with Integrated Regular and Express Ordering
- 9 R. van Dorp, Dependence Modelling for Uncertainty Analysis
- 10 D. van Schooneveld, Fractal Coding of Monochrome Digital Images
- 11 D. Roeleven, Modelling the Probability of Accident for Inland Waterway Transport
- 12 W. van der Sluis, The Coordination of Production and Distribution in a Decentralized Distribution Chain: A Contractual Approach
- 13 A.G. Chessa, Object-based Modelling of Hydrocarbon Reservoirs
- 14 M. Kwak, Planning and Replenishment for a Seasonal Demand Pattern
- 15 P. van Kampen, Maintenance Management of Multi-Component Objects
- 16 C. de Blois, Dynamic Pollutant Transport Modeling for Policy Evaluation in the Rhine Basin
- 17 G. van Acken, Hoe goed is een klant?
- 18 J.B. Molenkamp, Matching of assets and liabilities for pension funds
- 19 A.J. Bomans, Validation of a Model for Optimising Decisions on Maintenance
- 20 M.A. Odijk, Performance Evaluation of Railway Junction Track Layout Designs
- 21 S.M. Geervliet, Modellering van de Faalkans van Ondergrondse Transportleidingen
- 22 R.R. Witberg, A Neural Network Solution to Wireline-log Recognition Applications
- 23 H. de Blank, Beslissingsondersteunend Systeem voor het Persproces van Mengvoeders

- 24 M.C. Rozema, RailEase, Ondersteuning bij het Specificeren van Railinfrastructuur in Knooppunten
- 25 J. Dorrepaal, Analysis Tools for Reliability Databases
- 26 G.M. te Brake, Automated Detection of Stellate Lesions and Architectural Distortions in Digital Mammograms
- 27 S.T. van Houwelingen, Petrophysical Conductivity Modelling – Determination of Effective Conductivity and Electro-Type Tool Response Modelling
- 28 R.P.M. Goverde, Civil Aircraft Autopilot Design Using Robust Control
- 29 W.W.J. Götz, Influence Diagrams and Decision Trees in Severe Accident Management
- 30 J.P.A. van der Vliet, Assets Liability Matching for Life Insurers
- 31 M.P.C. Alders, Spatio-spectral Analysis of Wireline Logs
- 32 J.W.P. Karelse, Risicomanagement bij een Woningcorporatie met Monte Carlo Simulaties
- 33 F.L. Härte, Efficiency Analysis of Packaging Lines
- 34 H.L. Liem, Gedragsanalyse van Luchtvaartmaatschappijen met Betrekking tot Geluidsbelasting op Schiphol
- 35 N.P. van Elst, Betrouwbaarheid van het Sluitproces van Beweegbare Waterkeringen
- 36 L. Lam, The Analysis of Doubly Censored Survival Data







The Department of Mathematics and Computer Science at Delft University of Technology offers a selected group of people a two-year post-Master's program featuring specialized instruction in practical mathematical modeling and consultancy skills (in Dutch: Wiskundige Beheers- en Beleidsmodellen). Participants follow courses in the first year of the program and apply their skills in a project in the second year. Projects are carried out under contract with a company or independent research institute. The WBBM Report Series contains the final reports of these projects.



Delft University of Technology
Wiskundige Beheers- en Beleidsmodellen

ISBN 90-407-1763-X