

# Optimalisatie van de spoorwegdienstregeling bij de Nederlandse Spoorwegen



Michael Lie

April 2011



*Begeleider NS:*  
prof. dr. L.G. Kroon



*vrije Universiteit*

*Begeleiders VU:*  
prof. dr. R.D. van der Mei  
A. Roubos, MSc



# Voorwoord

De Masterstudie Business Mathematics and Informatics wordt afgesloten met een afstudeerstage. Deze stage moet een product opleveren dat van waarde is voor de stageverlenende organisatie. Deze scriptie is het resultaat van mijn afstudeerstage die ik heb uitgevoerd bij de innovatiegroep van de logistieke afdeling van de Nederlandse Spoorwegen.

Gedurende zes maanden heb ik onderzoek gedaan naar een optimalisatiemodel voor een spoorwegdienstregeling. Het was een zeer uitdagend probleem waar ik met veel plezier aan heb gewerkt. Met name het werken aan een probleem waar eigenlijk iedereen in de maatschappij mee te maken heeft vond ik erg interessant. Tijdens mijn stage heb ik inzicht kunnen krijgen hoe het is om te werken bij zo een organisatie, en dat is dankzij de aangename sfeer die er heerste op de afdeling zeer goed bevallen.

Graag zou ik mijn begeleider van de NS Leo Kroon willen bedanken voor zijn hulp gedurende de hele stage. Te allen tijde kon ik bij hem langs als ik vragen had en zijn adviezen waren altijd van grote waarde. Verder wil ik mijn begeleider van de VU Rob van der Mei bedanken voor de inzichtrijke ideeën tijdens onze besprekingen en het herzien van mijn scriptie. Zijn enthousiasme zorgde altijd voor extra motivatie om aan het probleem te werken. Ook wil ik Alex Roubos bedanken voor het herzien van mijn scriptie. Dank gaat uit naar Dennis Huisman die het mogelijk heeft gemaakt deze stage te lopen. Daarnaast ben ik Sandjai Bhulai heel erg dankbaar voor het helpen naar het zoeken van een stage. Tenslotte wil ik alle collega's van de NS bedanken voor de gezellige periode die ik heb gehad tijdens mijn stage.



# Samenvatting

Met een van de drukst bezette spoorwegnetwerken van Europa is het van belang dat de Nederlandse Spoorwegen een efficiënte dienstregeling hebben. Het huidige model om een dienstregeling te plannen zoekt in eerste instantie alleen naar een mogelijke planning. In dit onderzoek zal gekeken worden naar de mogelijkheid om het plannen te optimaliseren. Verder zal er ook worden gekeken of het mogelijk is om rekening te houden met de structuur binnen een station, iets waar in het huidige model alleen beperkt rekening mee wordt gehouden.

Door het probleem te formuleren als een mathematisch programmeringsprobleem, kon met CPLEX een planning berekend worden die geoptimaliseerd was naar minimale halteertijden van treinen. Voor een netwerk dat bestond uit alle NS treinen in de daluren kon een planning berekend worden die maximaal 19% verschilde met de optimale oplossing. Door alle perrons in het model te verwerken kon ook tot op zekere hoogte rekening worden gehouden met de stationsstructuur. Dit maakte het probleem voor CPLEX wel complexer en de planning die berekend werd verschilde maximaal 35% met de optimale oplossing.

Het blijkt dus mogelijk te zijn om bij het plannen te optimaliseren, maar het bewijzen of de oplossing optimaal is echter te complex. Ook kon met de structuur binnen de stations tot op zekere hoogte rekening worden gehouden. Omdat het model niet precies lijkt op het huidige model van de NS, is verder onderzoek noodzakelijk om te bepalen hoeveel winst hiermee te behalen valt.



# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>11</b>
1.1	Doel onderzoek . . . . .	11
1.2	Relevantie . . . . .	12
1.3	Literatuuroverzicht . . . . .	13
1.4	Indeling scriptie . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Planningsproces bij de Nederlandse Spoorwegen</b>	<b>15</b>
2.1	Planning complete dienstregeling . . . . .	15
2.1.1	Lijnplanning . . . . .	16
2.1.2	Dienstregeling planning . . . . .	16
2.1.3	Materieel planning . . . . .	16
2.1.4	Personeel planning . . . . .	17
2.2	Plannen van dienstregeling . . . . .	17
2.2.1	Het doel van plannen de dienstregeling . . . . .	18
2.2.2	Voorwaarden van de dienstregeling . . . . .	18
2.2.2.1	Cyclische dienstregeling . . . . .	18
2.2.2.2	Veiligheidseisen . . . . .	19
2.2.2.3	Keertijd . . . . .	19
2.2.2.4	Halteertijd . . . . .	19
2.2.2.5	Synchronisatie van treinen . . . . .	19
2.2.3	Het plannen van het BUP . . . . .	20
2.2.4	Van BUP tot dienstregeling voor het hele jaar . . . . .	21
2.3	Focus van dit onderzoek . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Modelformulering voor het plannen van een spoorwegdienstregeling</b>	<b>25</b>
3.1	Periodic Event Scheduling Problem . . . . .	25
3.1.1	Definitie . . . . .	25
3.1.2	PESP gerepresenteerd door een graaf . . . . .	26
3.2	PESP modelformulering van het cyclische spoorwegdienstregeling probleem . . . . .	27
3.2.1	Aankomsten en vertrekken van treinen . . . . .	27
3.2.2	Uurlijkse dienstregeling . . . . .	27
3.2.3	Restricties van de dienstregeling . . . . .	28

3.2.4	Symmetrie . . . . .	28
3.2.5	Optimalisatie . . . . .	28
3.2.6	Modelformulering . . . . .	29
3.3	Cycle Periodicity Formulation . . . . .	29
3.3.1	CPF spanningen en potentialen . . . . .	30
3.3.2	Transformatie van het PESP naar CPF . . . . .	30
3.3.3	Cykel basis voor de CPF . . . . .	31
3.3.4	Symmetrie . . . . .	32
3.3.5	Cutting plane toepassen . . . . .	33
3.3.6	CPF modelformulering van het cyclische spoorwegdienstregeling probleem . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Eigenschappen van het model</b>	<b>37</b>
4.1	Aannamen . . . . .	37
4.1.1	Infrastructuur . . . . .	37
4.1.2	Treinseries . . . . .	38
4.1.3	Vaste rittijden . . . . .	38
4.1.4	Variabele halteertijden . . . . .	38
4.1.5	Stationsstructuur . . . . .	39
4.1.6	Volgorde van treinen . . . . .	39
4.2	Dienstregeling restricties . . . . .	41
4.2.1	Rittijd . . . . .	41
4.2.2	Halteertijd . . . . .	41
4.2.3	Frequentie . . . . .	42
4.2.4	Keertijd . . . . .	42
4.2.5	Opvolging . . . . .	42
4.2.6	Symmetrie . . . . .	44
4.2.7	Enkelsporigheid . . . . .	45
4.2.8	Synchronisatie . . . . .	46
4.2.9	Gekoppelde treinseries . . . . .	47
4.2.10	Vleugeltreinen . . . . .	47
4.2.11	Kruisingen . . . . .	49
4.2.12	Structuur van een station . . . . .	50
4.3	Doelstellingen van het model . . . . .	51
4.3.1	Minimalisatie halteertijden . . . . .	51
4.3.2	Minimalisatie gewogen halteertijden . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Resultaten</b>	<b>55</b>
5.1	Dataset . . . . .	55
5.2	Resultaten . . . . .	56
5.2.1	Vergelijking PESP formulering en CPF . . . . .	57
5.2.2	CPF resultaten . . . . .	58
5.2.3	PESP resultaten . . . . .	59



<b>6 Conclusie en discussie</b>	<b>63</b>
6.1 Conclusies . . . . .	63
6.1.1 Symmetrie . . . . .	65
6.1.2 Optimalisatie met gewogen halteertijden . . . . .	65
6.2 Vergelijking met andere studies . . . . .	65
6.3 Suggesties voor verder onderzoek . . . . .	66
<b>A Afkortingen</b>	<b>71</b>
<b>B Datasets</b>	<b>73</b>
B.1 Intercity netwerk . . . . .	73
B.2 Netwerk met alle NS treinen . . . . .	74



# Hoofdstuk 1

## Inleiding

De Nederlandse Spoorwegen (NS) vervoeren dagelijks ruim 1,2 miljoen reizigers en elk jaar stijgt dit aantal klanten met een paar procent. Hiermee heeft Nederland een van de drukste spoorwegnetten van Europa. Om zoveel klanten te kunnen vervoeren, is een efficiënte dienstregeling van groot belang.

Het plannen van de dienstregeling is een ingewikkeld probleem, aangezien er rekening moet worden gehouden met veel factoren. De NS hebben in samenwerking met het Centrum voor Wiskunde & Informatica (CWI) het model CADANS ontwikkeld voor het plannen van het Basis Uur Patroon (BUP) dat de basis vormt voor de dienstregeling. Dit model wordt sinds 2000 gebruikt om het BUP te plannen.

Door CADANS te gebruiken, konden er meer treinen ingepland worden om het groeiende aantal klanten te kunnen vervoeren. Bovendien kon de robuustheid van de dienstregeling verbeterd worden door grotere buffers in te plannen, waardoor er minder vertragingen zijn. Mede dankzij deze nieuwe dienstregeling, vond er een snellere stijging van het aantal klanten plaats en werd de punctualiteit hoger.

CADANS kan een mogelijk BUP plannen, dat voldoet aan allerlei verschillende voorwaarden. Wanneer een BUP gevonden is, vindt er nog een post-optimalisatie plaats voor betere overstaptijden voor de reizigers. Het is echter niet mogelijk om vanaf het begin te zoeken naar een optimale planning voor het BUP. Dit onderzoek zal kijken naar de mogelijkheid om te zoeken naar een optimale planning voor het BUP ten opzichte van verschillende doelstellingsfuncties.

### 1.1 Doel onderzoek

Het doel van dit onderzoek is om te kijken of het mogelijk is een model te bouwen dat zoekt naar een optimale planning voor het BUP ten opzichte van verschillende doelstellingsfuncties. Mogelijke doelstellingsfuncties zijn: het minimaliseren van de reistijd van de reizigers en het maximaliseren naar de

robuustheid van de dienstregeling. De volgende onderzoeksvraag wordt in deze scriptie onderzocht:

*In hoeverre is het mogelijk om het plannen van het BUP te optimaliseren naar verschillende doelstellingsfuncties?*

We zullen verschillende mogelijkheden onderzoeken die kunnen helpen om het plannen van het BUP te optimaliseren. Een belangrijk punt zal zijn om te kijken of het mogelijk is om rekening te houden met de routeringen binnen de stations. CADANS houdt hier nog niet volledig rekening mee, omdat dit op zichzelf al een complex probleem is.

Voor dit probleem is een ander model ontwikkeld, namelijk STATIONS. Dit model berekent de optimale routing voor de treinen binnen de stations, mits dit mogelijk is gegeven de aankomst en vertrektijden die berekend zijn door CADANS. Indien dit niet mogelijk is, zal STATIONS aangeven waar de knelpunten zitten. CADANS zal hier vervolgens rekening mee houden bij het berekenen van een nieuwe planning. Dit proces herhaalt zich tot een planning is berekend, waarbij de routing binnen de stations ook mogelijk is.

Door alvast een deel van de stationsstructuur mee te nemen in het model om het BUP te plannen, wordt de kans groter dat het met de gevonden planning ook mogelijk is om de treinen binnen de stations te routeren. Bovendien zal het model tijdens de optimalisatie al rekening houden met de stationsstructuur, wat positief kan zijn voor de optimale oplossing. Dit brengt ons op de volgende deelvraag:

*In hoeverre is het mogelijk om bij de planning van de dienstregeling rekening te houden met de routing van de treinen binnen de stations?*

## 1.2 Relevantie

Een optimale planning voor het BUP levert de NS veel voordelen op. Ten eerste kan de service voor de reiziger verbeterd worden. Doordat je de mogelijkheid hebt om te optimaliseren, kun je de treinen zo plannen dat er zo kort mogelijke halteertijden zijn voor de treinen. Daarnaast kun je sturen op optimale overstaptijden, zodat reizigers minder lang hoeven te wachten op hun aansluitingen. Hierdoor zal de totale reistijd voor de reizigers minder worden. Verder kun je sturen op de punctualiteit om ervoor te zorgen dat de reizigers minder vertraging hebben.

Deze verbetering van de service kan er toe leiden dat er meer mensen met de treinen reizen, waardoor de opbrengsten stijgen. Een betere service is ook van grote maatschappelijke waarde. Een hoge punctualiteit heeft namelijk een positief effect op de Nederlandse economie. Het Centraal Plan Bureau schat dat elk extra procent in punctualiteit acht miljoen euro aan directe opbrengsten oplevert voor de Nederlandse economie.

Ten tweede kan een optimale planning zorgen voor besparingen op voor het personeel en materieel. Door de totale reistijd te verkorten en de keertijden te

verkorten, kan het personeel een langer traject afleggen op een werkdag. Ook kan het materieel hierdoor efficiënter worden ingezet.

Tot slot kan het planningsproces van de dienstregeling ook efficiënter worden. Het huidige model houdt in eerste instantie beperkt rekening met hoe de treinen binnen een station gerouteerd worden, waardoor er soms een niet mogelijke dienstregeling wordt gegenereerd. Door een groot deel van het probleem van de routing van de treinen in het model op te nemen, is de kans groter dat de oplossing die door het model gevonden wordt ook echt een mogelijke oplossing is. Je hoeft dan niet steeds opnieuw een nieuwe planning te genereren.

### 1.3 Literatuuroverzicht

Deze paragraaf geeft een beknopt overzicht van studies over een cyclische dienstregeling die relevant zijn voor deze scriptie. De meeste onderzoeken naar een cyclische dienstregeling zijn gebaseerd op het Periodic Event Scheduling Problem (PESP). Het PESP is geïntroduceerd door Serafini en Ukovich (1989) [11]. Dit is een model voor het plannen van events die periodiek plaatsvinden. Voor het plannen van een spoorwegdienstregeling, zijn de events vertrekken en aankomsten van treinen. Met dit model probeer je de tijden van deze events vast te stellen. In hoofdstuk 3.1 wordt het PESP uitgebreid beschreven.

Schrijver en Steenbeek (1993) [10] hebben een algoritme ontwikkeld dat zoekt naar een mogelijke dienstregeling, genaamd CADANS. Dit algoritme zoekt naar een oplossing van het probleem, gegeven een verzameling van PESP restricties. Mocht er geen oplossing zijn, dan geeft dit algoritme aan waar de knelpunten zijn. Als er een mogelijke dienstregeling is gevonden, volgt er een postoptimalisatie door de vertrek- en aankomsttijden te veranderen, zonder de volgordes van treinen te veranderen.

Nachtigall (1994) [7] heeft een transformatie van het klassieke PESP model beschreven, welke de Cycle Periodicity Formulation (CPF) genoemd. Hij formuleert het probleem met procestijden en cykels. Hierover wordt meer uitgelegd in hoofdstuk 3.3.

Peeters (2003) [9] heeft onderzoek gedaan naar optimalisatie van een cyclische spoorwegdienstregeling, gebaseerd op het PESP. De optimalisaties werden toegepast op een deel van de treinseries van de NS. Hij maakte hierbij gebruik van zowel het klassieke PESP model, als van de CPF. De CPF bleek kortere rekestijden te vereisen en betere oplossingen te vinden bij het optimaliseren van een cyclische spoorwegdienstregeling.

Liebchen (2008) [6] heeft de wiskundige technieken toegepast om de dienstregeling van de Berlijnse metronetwerk te optimaliseren. Hij maakte hierbij gebruik van de CPF. Het is de eerste geoptimaliseerde spoorwegdienstregeling die in gebruik is genomen. Hierbij wordt geoptimaliseerd naar minimale operationele kosten en minimale overstap- en halteertijden. Dit resulteerde in kortere overstap- en halteertijden, en kon er een metro bespaard worden.

## 1.4 Indeling scriptie

De indeling van de rest van het scriptie ziet er als volgt uit. In hoofdstuk 2 wordt beschreven hoe het proces verloopt van de gehele planning bij de NS. In hoofdstuk 3 wordt uitgelegd welke modelformuleringen zijn gebruikt om het model te bouwen. Vervolgens zal er in hoofdstuk 4 worden beschreven hoe het model precies in elkaar zit, onder andere worden alle restricties waaraan een oplossing moet voldoen uitgelegd. In hoofdstuk 5 zijn de resultaten van het onderzoek beschreven. Tenslotte worden in hoofdstuk 6 conclusies getrokken aan de hand van deze resultaten en wordt de betekenis van de onderzoeksresultaten besproken.

Elk hoofdstuk zal beginnen met een kort overzicht van wat er in het hoofdstuk beschreven wordt en zal eindigen met een samenvatting van het hoofdstuk.

## Hoofdstuk 2

# Planningsproces bij de Nederlandse Spoorwegen

In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe de dienstregeling bij de NS op dit moment gepland wordt. Het geeft een kort overzicht van welke stappen eraan voorafgaan, welk model er wordt gebruikt voor het plannen, van welke data er gebruik werden gemaakt en hoe het uiteindelijk een dienstregeling wordt. Tot slot wordt uitgelegd waar de focus van dit onderzoek op ligt.

### 2.1 Planning complete dienstregeling

In dit deelhoofdstuk wordt uitgelegd hoe het hele planningsproces bij de Nederlandse Spoorwegen in zijn werk gaat. Dit houdt niet alleen het plannen van de BUP in, maar ook de lijnplanning die hieraan vooraf gaat en de planningen voor het materieel en het personeel. Voor deze planningen zijn diverse tools ontwikkeld. Deze tools dienen ter ondersteuning van het planningsproces. Het hele proces is zo complex dat dit niet in één model past. Zie figuur 2.1.1 voor een schematisch overzicht van het gehele planningsproces.



Figuur 2.1.1: Planningsproces

### 2.1.1 Lijnplanning

Alvorens een dienstregeling gepland kan worden moeten eerst de lijnen gepland worden. Dit houdt in dat er bepaald moet worden op welke trajecten er treinen rijden, wat voor soort treinen er rijden, waar deze treinen stoppen, met welke frequentie deze treinen rijden en ook welke overstappen er ten minste moeten zijn. Dit wordt vervolgens als input gebruikt bij het plannen van het dienstregeling.

Voor het plannen van de lijnen moet men rekening houden met de eigenschappen van de infrastructuur. Op baanvakken waar meerdere sporen liggen kunnen meer treinen rijden, dan op baanvakken waar alleen maar één spoor ligt. Het plaatsen van extra spoor kost veel geld, dus de infrastructuur wordt niet vaak uitgebreid.

Een andere belangrijke factor waar men rekening mee moet houden zijn de politieke wensen. De NS beschikken over een concessie voor het hoofdrailnet, naast een aantal regionale lijnen. Hierbij worden verplichtingen gesteld vanuit de overheid. Een voorbeeld van een verplichting is dat er op de grotere stations ten minste twee keer per uur een trein rijdt in iedere richting. Deze verplichtingen zullen dus in de lijnplanning moeten worden opgenomen.

De laatste factor is de vraag van de reizigers. Het aantal treinen dat rijdt is afhankelijk van hoeveel vraag er is. Hiervoor gebruikt men metingen van hoeveel mensen van de ene plaats naar de andere plaats gaan. Deze informatie is verwerkt in een herkomst-bestemmingsmatrix.

Rekening houdend met deze factoren wordt er een lijnplanning gemaakt. Het doel is om de treinen zo te laten rijden, dat dit voldoet aan de vraag van de reizigers, terwijl rekening wordt gehouden met verschillende criteria. Mogelijke criteria zijn zo veel mogelijke directe verbindingen, zo laag mogelijke operationele kosten, en zo kort mogelijke reistijden.

Voor het plannen van de dienstregeling van 2007 van de NS zijn tien verschillende lijnplanningen overwogen. Hiervan zijn vervolgens dienstregelingen gemaakt en voor deze dienstregelingen werd de punctualiteit getest. Ook werd het verwachte aantal reizigers, de kosten en de inkomsten berekend. Op basis van deze uitkomsten werd bepaald welke lijnplanning de NS gingen voeren. Uiteindelijk is het een mix van twee lijnplanningen geworden [3].

### 2.1.2 Dienstregeling planning

De lijnplanning dient als input voor het plannen van de dienstregeling. Zie hoofdstuk 2.2 voor een uitgebreide beschrijving van hoe dit proces verloopt.

### 2.1.3 Materieel planning

De volgende stap is het plannen van het materieel. De meeste treinen die rijden in Nederland bestaan uit elektrische treinstellen. Deze treinstellen kunnen in beide richtingen rijden, zonder locomotief. Hier bestaan verschillende types van, bijvoorbeeld enkeldekkers en dubbeldekkers. Voor elke lijn moet bepaald worden



welk type materieel er rijdt. Ook kan men variëren in het aantal eenheden per trein. Omdat het aantal reizigers per traject sterk verandert op een dag, verandert ook het aantal eenheden dat rijdt voor een bepaalde treinserie op een dag. Een treinstel hoeft echter niet alleen voor een bepaalde treinserie te rijden.

Men wil het materieel zo plannen dat zo efficiënt mogelijk alle reizigers comfortabel vervoerd kunnen worden. Hiervoor is er bijvoorbeeld een restrictie dat iedere reiziger die meer dan vijftien minuten in de trein zit, een zitplaats moet hebben. Hiervoor wordt echter een uitzondering in de spits gemaakt, omdat er dan veel meer reizigers zijn dan in de daluren.

Daarnaast probeert men ook te zorgen voor een robuuste planning van het materieel. Door bijvoorbeeld het aantal rangeerbewegingen te beperken, heeft een storing minder invloed op de rest van de dienstregeling, aangezien bij veel rangeerbewegingen gebruik wordt gemaakt van het algemene spoor. Er zal dus een afweging gemaakt moeten worden tussen de service, efficiëntie en robuustheid bij het plannen van het materieel.

Voor het plannen van het materieel is het model ROSA (rolling stock allocation) ontwikkeld. Dit model is gebaseerd op een multicommodity flow model, waarbij elke commodity een type van een treinstel is.

#### **2.1.4 Personeel planning**

Elke trein moet bestuurd worden door een machinist, en afhankelijk van de grootte van de treinsamenstelling moeten er een aantal conducteurs aanwezig zijn. Omdat er rekening moet worden gehouden met diverse arbeidsvoorwaarden, is dit een erg complex probleem. Enkele voorbeelden waar rekening mee moet worden gehouden zijn dat het personeel weer thuis moet komen, dat er pauzes moeten zijn om te kunnen eten en om naar het toilet te kunnen gaan, en ook dat er variatie moet zitten in de route waarop iemand werkt. Daarnaast kan een machinist niet op elk traject reizen en niet altijd alle soorten treinen besturen. Hierdoor wordt het probleem nog gecompliceerder.

Ook het personeel probeert men zo efficiënt en robuust mogelijk in te plannen. De efficiëntie kan verbeterd worden door bijvoorbeeld met zo min mogelijk personeel alle diensten te bezetten. De robuustheid kan verbeterd worden door bijvoorbeeld langere overstaptijden in te plannen. Wanneer een trein vertraagd is, kan een langere overstaptijd deze vertraging beter opvangen.

Voor dit planningsprobleem is het model LUCIA ontwikkeld. Dit model is gebaseerd op een set covering model, waarbij de verzameling van taken bedekt moet worden door potentiële diensten te selecteren.

## **2.2 Plannen van dienstregeling**

In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe het proces van het plannen van de dienstregeling in zijn werk gaat. In de dienstregeling staan alle geplande aankomst- en vertrektijden voor alle treinen in elk station. Er zal worden uitgelegd met welke factoren er rekening moet worden gehouden om tot een

dienstregeling te komen en welke stappen er voorafgaan totdat er een volledige dienstregeling is.

### **2.2.1 Het doel van plannen de dienstregeling**

Er zijn verschillende aspecten belangrijk bij het plannen van de dienstregeling, namelijk de efficiëntie, de service en de robuustheid van de dienstregeling. Met een efficiënte dienstregeling wordt een dienstregeling bedoeld, die zo weinig mogelijk kost. Door treinen minder lang te laten halteren op stations, duurt het minder lang voor het personeel om op een bepaald traject te werken. Hierdoor heb je minder personeelsuren nodig, om de dienstregeling uit te voeren, wat bespaart op de kosten.

Ook op de kosten van het materieel kan worden bespaard door bijvoorbeeld de halteertijden op stations te verminderen of de keertijden op de eindpunten te verminderen. Het materieel hoeft dan minder lang te worden ingezet en mogelijk is er minder materieel nodig om de dienstregeling uit te voeren.

De service voor de reizigers is ook erg belangrijk. Ook de reizigers zijn gebaat bij kortere halteertijden, want dit betekent voor de meeste mensen dat hun reis korter duurt. Daarnaast kunnen gunstige overstaptijden de totale reisduur van de reiziger ook verkorten. Bovendien is het belangrijk voor de reizigers dat de treinen op tijd rijden. Dit heeft veel te maken met de robuustheid van de dienstregeling.

Een robuuste dienstregeling kan vertragingen makkelijk opvangen. Dit wil zeggen dat een vertraging geen grote gevolgen heeft voor de rest van de dienstregeling. Door buffertijden op te nemen in de rit-, halteer- en opvolgtijd kunnen vertragingen makkelijker worden opgevangen.

Daar waar men voor de service zo kort mogelijke halteertijden wil hebben, is het voor de robuustheid belangrijk dat er buffers in de halteertijden zitten, zodat de punctualiteit omhoog gaat. Beide aspecten zijn belangrijk, maar ook tegenstrijdig. Hier zal dus een afweging gemaakt moeten worden tussen de kosten, service en robuustheid.

### **2.2.2 Voorwaarden van de dienstregeling**

De dienstregeling moet aan diverse voorwaarden voldoen waar men rekening mee moet houden bij het plannen. Deze voorwaarden komen voort uit onder andere veiligheidsoverwegingen en service-overwegingen. Deze voorwaarden worden in de volgende paragrafen uitgelegd.

#### **2.2.2.1 Cyclische dienstregeling**

De basis voor de dienstregeling bij de NS is een cyclische dienstregeling in het uur. Dit wil zeggen dat elk uur de dienstregeling hetzelfde is. Hierdoor is het voor de reiziger makkelijk te onthouden wanneer de treinen vertrekken. Bij het plannen van de dienstregeling zal er daarom eerst een Basis Uur Patroon worden gepland, om tot een complete dienstregeling te komen.

### **2.2.2.2 Veiligheidseisen**

Om ervoor te zorgen dat treinen niet tegen elkaar botsen, is er op het spoor een beveiligingssysteem aanwezig. Om de duizend tot tweeduizend meter is er een sein aanwezig. Dit sein kan een groen, geel of rood signaal geven. Een groen sein geeft aan dat het veilig is om door te rijden. Een geel sein geeft aan dat het veilig is om door te rijden, maar dat het volgende stoplicht op rood staat. Een rood sein geeft aan dat de trein moet stoppen, omdat vlak ervoor een trein rijdt.

Bij het plannen wordt rekening gehouden met dit beveiligingssysteem. Hiervoor is een minimum opvolgtijd geïntroduceerd. Dat is de minimale tijd die er tussen treinen moeten zitten die elkaar opvolgen, om te zorgen dat dit veilig gebeurt. Hierdoor zullen de treinen geen rood sein tegenkomen, mits er geen verstoringen zijn. Aan deze opvolgtijd moet men zich houden voor alle treinen die op hetzelfde spoor rijden.

### **2.2.2.3 Keertijd**

Op de eindbestemming van een traject zal een trein keren. De tijd tussen het bereiken van het eindpunt en het vertrekken van het beginpunt wordt de keertijd genoemd. Deze tijd moet groot genoeg zijn, zodat de trein schoongemaakt kan worden en zodat de trein eventueel nog naar het goede spoor kan rijden. Wanneer deze tijd niet groot genoeg is, zal een andere trein ingezet moeten worden voor de terugrit. De keertijd moet ook niet te groot zijn, want dan wordt de trein niet efficiënt ingezet.

### **2.2.2.4 Halteertijd**

Op de grotere stations, die vaak als overstapstations gebruikt worden, worden normen gehanteerd voor de minimale tijd om te halteren. Dat is de tijd die een trein op een station wacht bij het in- en uitstappen van reizigers. Omdat bij de grotere stations meer reizigers in- en uitstappen, zijn er voor deze stations hogere minimale halteertijden.

### **2.2.2.5 Synchronisatie van treinen**

Er zijn veel treinen die op elkaar afgestemd moeten worden, om verschillende redenen. Ten eerste zijn er treinseries die voor een bepaald gedeelte op hetzelfde traject rijden. Dan is het prettig voor de reiziger dat deze treinen gelijk over het uur verdeeld zijn. Tussen bepaalde treinseries is dus vastgesteld dat ze een bepaalde tijd van elkaar vertrekken.

Daarnaast zijn er overstapverbindingen tussen bepaalde treinseries. Om het voor de reiziger mogelijk te maken om over te stappen, moet de trein waar de reizigers naar overstappen, minimaal en maximaal een aantal minuten later vertrekken na de aankomst van de andere trein.

Tot slot zijn er vleugeltreinen die gesynchroniseerd moeten worden. Vleugeltreinen zijn treinen die gecombineerd worden met andere treinen die

op een bepaald gedeelte van de reis hetzelfde traject volgen. Hierdoor kunnen twee treinseries rijden op hetzelfde traject, zonder dat er meer spoorcapaciteit vereist is. Om ervoor te zorgen dat een vleugeltrein op tijd gecombineerd kan worden, moet deze trein binnen een bepaalde tijd voor of na de andere trein aankomen.

### 2.2.3 Het plannen van het BUP

Nadat er een lijnplanning is gemaakt, kan er een dienstregeling worden gepland. Men zal eerst een BUP plannen, en vervolgens zal deze worden uitgebreid tot week- en dagniveau. Deze paragraaf zal uitleggen hoe het BUP wordt gepland.

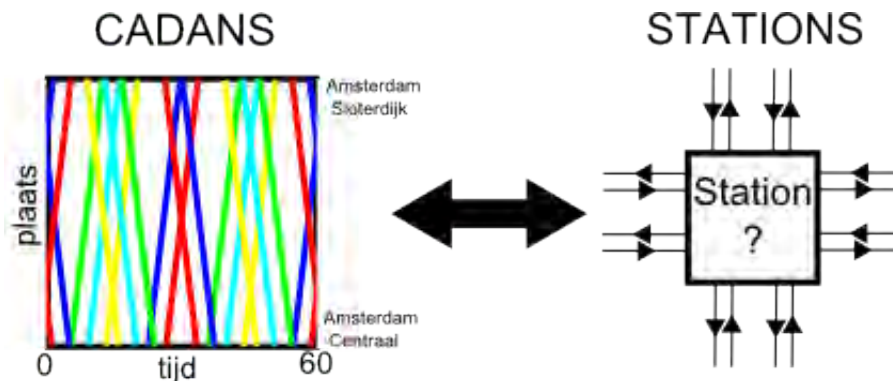
Het BUP wordt gegenereerd met de tool DONS, wat bestaat uit de modellen CADANS en STATIONS. CADANS is een model dat ontwikkeld is door Schrijver en Steenbeek (1993) [10]. Dit model is gebaseerd op constraint programming en berekent een BUP, indien er een mogelijk BUP is die voldoet aan alle voorwaarden. Wanneer dit niet mogelijk is geeft CADANS aan waardoor er geen mogelijk BUP is. Het is niet mogelijk om direct het BUP te optimaliseren. Nadat er een BUP is gevonden, zullen er echter wel postoptimalisaties plaatsvinden die overstaptijden voor de reizigers verbeteren. Hierbij worden er kleine aanpassingen gemaakt aan de vertrek- en aankomsttijden van de treinen, zonder de structuur van de gevonden dienstregeling te veranderen. Dit model houdt in eerste instantie beperkt rekening met hoe de treinen binnen de stations gerouteerd moeten worden.

Hoe deze treinen binnen de stations gerouteerd moeten worden is op zichzelf een complex probleem. Bij de grote stations komen er treinen uit veel verschillende richtingen en dan is de kans groot dat treinen elkaar zullen hinderen. Het is dus belangrijk dat de treinen zo gerouteerd worden, dat er geen problemen ontstaan.

Voor elke trein moet worden vastgesteld op welk spoor ze gaan halteren. Daarnaast moet er bepaald worden welke route er gebruikt wordt bij aankomst en vertrek van het station. Er moet dus rekening worden gehouden met dat er nooit meer dan één trein hetzelfde stuk infrastructuur gebruikt. Hiervoor zijn dus alle aankomst- en vertrektijden nodig die door CADANS zijn gepland.

Om dit routeringsprobleem op te lossen is het model STATIONS ontwikkeld door Zwaneveld et al. (1996) [12]. Dit model is gebaseerd op een set packing model, waarbij de rangeerbewegingen van de treinen ingepland moeten worden met de ruimte die in het station beschikbaar is. STATIONS berekent dus hoe de treinen, gegeven de aankomst- en vertrektijden, gerouteerd worden binnen het station indien dat mogelijk is. Mocht het niet mogelijk zijn zal STATIONS aangeven waar het precies mis gaat, en zal dit terug communiceren naar CADANS, die weer opnieuw een nieuw BUP plant. Dit is een itererend proces, totdat er een BUP gevonden is dat ook uitvoerbaar is binnen de stations.

In figuur 2.2.1 is deze iteratie tussen CADANS en STATIONS te zien. Aan de linkerkant is een tijd-weg diagram van het BUP te zien tussen Amsterdam Sloterdijk en Amsterdam Centraal, waarbij elke kleur een aparte treinserie voorstelt.



Figuur 2.2.1: Iteratie tussen CADANS en STATIONS

#### 2.2.4 Van BUP tot dienstregeling voor het hele jaar

Wanneer DONS eenmaals een BUP heeft gegenereerd, wordt deze uitgebreid tot week- en dagniveau. Op weekniveau wordt er rekening gehouden met de fluctuerende vraag op een dag en binnen een week en op dagniveau wordt er rekening gehouden met de fluctuerende vraag op specifieke dagen in het jaar.

Eerst wordt het BUP uitgebreid tot een wekelijkse dienstregeling. Binnen een dag zal dit plan verschillen van het BUP, omdat de vraag verschilt in dal- en piekuren, en de ochtend- en avonduren. Daarnaast zal de wekelijkse dienstregeling ook tussen de dagen zelf verschillen. Vooral tijdens het weekend en net voor en na het weekend zijn er grote verschillen in de vraag, waardoor er voor die dagen een aangepaste dienstregeling is. De wekelijkse dienstregeling wordt een paar keer per jaar aangepast, omdat de vraag en de beschikbaarheid van materieel en personeel verandert.

Daarna wordt de wekelijkse dienstregeling aangepast voor bepaalde dagen van het jaar, in verband met dagen of periodes waarbij er een grote verandering van de vraag is. Dit zijn bijvoorbeeld vakanties en feestdagen. Ook wordt de dienstregeling aangepast bij dagen of periodes dat er gewerkt wordt aan de infrastructuur. Wanneer ook deze uitbreidingen en aanpassingen zijn toegepast, is de planning van de dienstregeling voltooid.

### 2.3 Focus van dit onderzoek

Dit onderzoek zal zich focussen op het plannen van het BUP wat beschreven staat in paragraaf 2.2.3. Ten eerste wordt er onderzocht in hoeverre het mogelijk is om het plannen van het BUP te optimaliseren. Het huidige model CADANS zoekt naar een mogelijk BUP, en achteraf worden er postoptimalisaties toegepast. Ten tweede wordt er onderzocht in hoeverre het mogelijk is om rekening te houden met de routing van de treinen binnen het station. Dit wordt nu opgelost met het model STATIONS, maar door hier in een eerder

stadium al rekening mee te houden is het mogelijk hier rekening mee te houden bij het optimaliseren.

## Samenvatting hoofdstuk 2

- Bij de NS zijn diverse tools ontwikkeld ter ondersteuning van het planningsproces.
- De volgorde van het planningsproces is als volgt: lijnplanning, dienstregeling planning, materieel planning en personeel planning.
- Efficiëntie, service en robuustheid zijn de belangrijkste criteria bij het plannen.
- Het planningsproces van het BUP is een itererend proces tussen het vinden van een mogelijke dienstregeling en een mogelijke routing van de treinen binnen de stations.
- Het huidige model voor het plannen van het BUP heeft geen directe optimalisatie mogelijkheid.
- De focus van dit onderzoek ligt op het optimaliseren van het plannen van het BUP, inclusief het routeringsprobleem van de treinen.





## Hoofdstuk 3

# Modelformulering voor het plannen van een spoorwegdienstregeling

Dit hoofdstuk gaat over hoe het probleem van het plannen van een spoorwegdienstregeling te formuleren is. De eerste formulering die wordt onderzocht is gebaseerd op het Periodic Event Scheduling Problem (PESP). Deze formulering is gebaseerd op het plannen van periodieke events. De tweede formulering die wordt onderzocht is de Cycle Periodicity Formulation (CPF), welke gebaseerd is op het vaststellen van de procestijden. Deze formulering is te transformeren uit het PESP. In eerder onderzoek bleek deze formulering efficiënter te zijn voor het plannen van een spoorwegdienstregeling.

### 3.1 Periodic Event Scheduling Problem

Dit deelhoofdstuk zal het PESP beschrijven, die beschreven is door Serafini en Ukovich (1989) [11]. Deze formulering zal aan de basis staan van het model voor het plannen van een cyclische spoorwegdienstregeling.

#### 3.1.1 Definitie

Het PESP beschrijft een probleem waarin events gepland moeten worden die periodiek voorkomen, zodanig dat elk paar van events voldoet aan de tijdsrestrictie die gesteld is tussen deze twee events. Deze restricties geven aan hoeveel tijd er moet zitten tussen het plaatsvinden van beide events. Wanneer er een planning is gevonden die aan alle restricties voldoet, is er een toegestane oplossing gevonden. De formele definitie van het PESP is als volgt:

**Definitie.** PESP [9]: Gegeven een verzameling  $N$  van events, een verzameling  $A \subseteq N \times N$ , een periode tijd  $T$  en restricties  $[l_{ij}, u_{ij}] \forall (i, j) \in A$ , vindt

een periodieke planning  $v_i \in [0, T)$ ,  $i \in N$ , zodanig dat  $(v_j - v_i) \bmod T \in [l_{ij}, u_{ij}] \forall (i, j) \in A$ , of concludeer dat er geen toegelaten oplossing is.

Door een integer variabele  $p_{ij} \in \mathbb{Z}$  voor alle  $(i, j) \in A$  te introduceren, kunnen we het probleem omzetten in het volgende mathematische programmeringsprobleem:

---

**Algoritme 3.1** MIP formulering van het PESP

---

Vind een oplossing	$(\nu, p)$ ,	
zodanig dat	$l_{ij} \leq \nu_j - \nu_i + Tp_{ij} \leq u_{ij}$	$\forall (i, j) \in A$ ,
	$0 \leq \nu_i < T$	$\forall i \in N$ ,
	$p_{ij} \in \mathbb{Z}$	$\forall (i, j) \in A$ .

---

De variabele  $p_{ij}$  zorgt ervoor dat  $\nu_j - \nu_i$  kan worden teruggerekend naar het interval  $[0, T)$ . Aangezien alle events  $\nu$  periodiek zijn in  $T$  levert dit geen beperking op en kunnen alle restricties worden geformuleerd in het interval  $[0, T)$ . Het PESP is dus een probleem dat een toegelaten oplossing vindt.

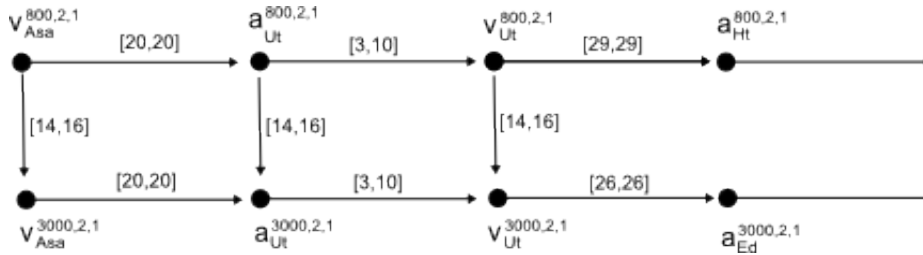
Wanneer alle  $l_{ij}$ ,  $u_{ij}$  en  $T$  geheeltallig zijn, zal een toegelaten oplossing geheeltallig zijn [9]. We nemen daarom aan dat deze variabelen geheeltallig zijn, om een geheeltallige oplossing te krijgen. De bovengrens voor de beslissingsvariabelen  $\nu_i$  kunnen we we daarom stellen op  $\nu_i \leq T - 1$ .

### 3.1.2 PESP gerepresenteerd door een graaf

Het PESP kan gerepresenteerd worden door een gerichte graaf  $G = (N, A, l, u)$  met periode tijd  $T$ . Hierbij stellen de knopen  $\nu \in N$  de events voor en zijn de kanten  $(i, j) \in A$  de relaties tussen de events. Het gewicht  $\nu \in N$  van de knoop geeft aan op welk tijdstip het event plaatsvindt, deze waarde ligt in het interval  $[0, T - 1]$ . De lengte van de kant  $(i, j) \in A$  geeft aan hoeveel tijd er tussen event  $i$  en  $j$  zit, deze waarde ligt ook in het interval  $[0, T - 1]$ . De lengte van elke kant heeft een onderlimiet  $l_{ij} \forall (i, j) \in A$  en een bovenlimiet  $u_{ij} \forall (i, j) \in A$ .

Op deze manier worden de restricties vastgesteld. Ook hier is een integer variabele  $p_{ij} \in \mathbb{Z}$  voor alle  $(i, j) \in A$  nodig, zodat alle restricties geformuleerd kunnen worden in het interval  $[0, T - 1]$ . Door gewichten toe te wijzen aan alle knopen, waarbij de lengtes van de kanten voldoen aan alle onder- en bovenlimieten, wordt een oplossing gevonden voor het PESP.

Zie figuur 3.1.1 voor een voorbeeld van een graaf met deze restricties. Het event waar de pijl naar toe wijst moet later plaatsvinden. De tijdsintervallen boven de pijlen geven aan hoeveel minuten er minimaal en maximaal tussen twee events moet zitten.



Figuur 3.1.1: PESP representatie door een graaf

## 3.2 PESP modelformulering van het cyclische spoorwegdienstregeling probleem

In dit deelhoofdstuk wordt de modelformulering voor het plannen van een cyclische spoorwegdienstregeling beschreven, die afgeleid is van het PESP. Het PESP is een generieke probleemformulering voor het plannen van periodieke events. Deze formulering is ook toepasbaar op het probleem van het plannen van cyclische spoorwegdienstregelingen. Hierbij wordt de aankomst of vertrek van een trein gerepresenteerd door een event en kunnen de meeste restricties worden gerepresenteerd door de tijdsrestricties van het PESP.

Restricties zoals symmetrie zijn echter niet in deze vorm te formuleren, en zullen op een andere manier geformuleerd worden. Wanneer het probleem is opgelost zullen de aankomst- en vertrektijden van alle treinen zijn vastgesteld. De formulering die in dit deelhoofdstuk wordt beschreven is de eerste van de twee formuleringen die onderzocht wordt.

### 3.2.1 Aankomsten en vertrekken van treinen

De aankomsten en vertrekken van treinen zijn de events die gepland moeten worden. In tegenstelling tot bij de standaard PESP formulering, kunnen treinen ook over een lineair tijdsinterval gepland worden. Dit tijdsinterval is  $[0, \tau]$ , waarbij  $\tau$  een voldoende grote waarde is zodat alle events zonder beperking achterelkaar kunnen worden ingepland. De planning van de events hoeft dus niet ingepland te worden tussen het tijdsinterval  $[0, T - 1]$ , waar  $T$  de duur is van een periode in een cyclische dienstregeling. De conversie naar het cyclische tijdsinterval  $[0, T - 1]$  zal pas plaatsvinden bij het verwerken van de resultaten. De events worden op de minuut nauwkeurig gepland, dus de tijdseenheid is een minuut.

### 3.2.2 Uurlijkse dienstregeling

In Nederland rijden de meeste treinen minstens twee keer per uur. Ook zijn er een aantal treinen die één keer in het uur rijden. Een periode zal dus 60 minuten duren en heeft  $T$  de waarde 60.

### 3.2.3 Restricties van de dienstregeling

De restricties van de dienstregeling worden in het model verwerkt door restricties te stellen aan de tijd die er mag zitten tussen twee events. Deze restricties hebben de standaard PESP formulering:

$$l_{ij} \leq \nu_j - \nu_i + T p_{ij} \leq u_{ij}. \quad (3.2.1)$$

Hierbij zijn  $\nu_i$  en  $\nu_j$  de tijd waarop respectievelijk event  $i$  en  $j$  plaatsvinden, en  $l_{ij}$  en  $u_{ij}$  zijn de onder- en bovenlimieten van de tijd die tussen event  $i$  en  $j$  mag zitten. Met de geheeltallige variabele  $p_{ij}$  kan het verschil tussen de events worden teruggerekend naar het interval  $[0, T - 1]$ , waardoor de restricties van de dienstregeling kunnen worden uitgedrukt in het interval  $[0, T - 1]$ .

Voor de restricties van de rittijd, halteertijd en frequenties is echter deze variabele  $p_{ij}$  overbodig, want events van dezelfde treinserie in dezelfde richting kunnen altijd na elkaar gepland worden. Terugrekenen naar het interval  $[0, T - 1]$  is dus bij deze restricties niet nodig. Deze restricties wijken dus af van de standaard PESP formulering.

### 3.2.4 Symmetrie

Symmetrie in een dienstregeling ontstaat automatisch wanneer de rittijden, halteertijden en overstaptijden voor de heen- en terugreis hetzelfde zijn. Zie hoofdstuk 4.2.6 voor een uitgebreide beschrijving van symmetrie in een dienstregeling. In deze scriptie gaan we onderzoeken wat het effect is als symmetrie in het model wordt meegenomen. De restrictie die hier bij hoort heeft een andere vorm dan de standaard PESP formulering:

$$l_{ij}^s \leq \nu_i + \nu_j \leq u_{ij}^s, \quad (3.2.2)$$

waar  $i$  en  $j$  elkaars symmetrisch tegenovergestelde events zijn. Met behulp van deze restrictie is het mogelijk om symmetrie in het model te vereisen. In paragraaf 4.2.6 wordt uitgebreider ingegaan op de symmetrie in de dienstregeling.

### 3.2.5 Optimalisatie

In het model is het mogelijk om te optimaliseren naar een bepaalde doelstellingsfunctie. Hiermee is het mogelijk om bijvoorbeeld de halteertijd, de kosten of de robuustheid te optimaliseren. Er wordt dan geminimaliseerd of gemaximaliseerd naar een functie  $f(\nu, p)$ . De doelstellingsfunctie om de halteertijden te minimaliseren ziet er als volgt uit:

$$f(\nu, p) = \sum_{(i,j) \in A_h} (\nu_j - \nu_i), \quad (3.2.3)$$

waar  $A_h$  de verzameling van de halteerrestricties is.

### 3.2.6 Modelformulering

Het mathematische programmeringsprobleem kan als volgt geformuleerd worden:

---

**Algoritme 3.2** MIP formulering van het aangepaste PESP

---

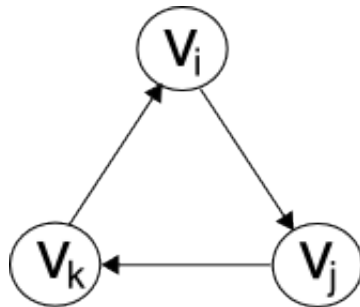
Minimaliseer	$f(\nu, p),$	
zodanig dat	$l_{ij} \leq \nu_j - \nu_i + Tp_{ij} \leq u_{ij}$	$\forall (i, j) \in A,$
	$l_{ij}^s \leq \nu_j + \nu_i + Tp_{ij} \leq u_{ij}^s$	$\forall (i, j) \in A_s,$
	$0 \leq \nu_i \leq \tau$	$\forall i \in N,$
	$0 \leq l_{ij} \leq T - 1, 0 \leq u_{ij} \leq T - 1$	$\forall (i, j) \in A,$
	$p_{ij} \in \mathbb{Z}$	$\forall (i, j) \in A.$

---

De oplossing van dit probleem is een optimale planning voor de gegeven doelstellingsfunctie, of een conclusie dat er geen oplossing mogelijk is die aan alle restricties voldoet. Naast deze formulering die gebaseerd is op het PESP, zal een andere formulering onderzocht worden in de volgende paragraaf.

### 3.3 Cycle Periodicity Formulation

In dit deelhoofdstuk wordt de tweede formulering die wordt onderzocht uitgelegd, namelijk de Cycle Periodicity Formulation (CPF). Deze formulering bleek veel efficiënter te zijn voor het plannen van een spoorwegdienstregeling [9]. Deze formulering kan getransformeerd worden vanuit het PESP. Waar de formulering die gebaseerd is op het PESP de periodieke events plant, worden bij de CPF de periodieke procestijden bepaald. Deze procestijden moeten zo worden bepaald dat de som van de procestijden van elke cykel in de graaf  $G$  een veelvoud van  $T$  is.



Figuur 3.3.1: Cykel in een graaf

De procestijden van deze cykel kunnen dan als volgt worden geschreven in termen van een standaard PESP restrictie:

$$p_{ij} = \nu_j - \nu_i + Tq_{ij} \quad (3.3.1)$$

$$p_{jk} = \nu_k - \nu_j + Tq_{jk} \quad (3.3.2)$$

$$p_{ki} = \nu_i - \nu_k + Tq_{ki} \quad (3.3.3)$$

Door deze procestijden te sommeren, vallen alle eventtijden weg en ontstaat de volgende vergelijking:

$$p_{ij} + p_{jk} + p_{ki} = T(q_{ij} + q_{jk} + q_{ki}) \quad (3.3.4)$$

De som van de procestijden moet dus een veelvoud zijn van  $T$ . Dit zorgt dan voor een periodiciteit van  $T$ . Dit voorbeeld kan toegepast worden op alle cyclen in een graaf.

### 3.3.1 CPF spanningen en potentialen

Bij de CPF formulering worden de procestijden bepaald, dat wil zeggen het verschil in tijd tussen de verschillende events. Deze procestijden worden periodieke spanningen genoemd, als analogie op een elektrisch circuit waarbij de spanning het potentiaalverschil is tussen twee punten. De periodieke spanningen worden aangeduid met  $x_a = \nu_j - \nu_i + Tp_a$ . Deze spanningen moeten voldoen aan de voorwaarden  $l_a \leq x_a \leq u_a \forall a \in A$ , dit zijn dezelfde tijdsrestricties als bij de eerste formulering. Wanneer de som van alle spanningen van elke cykel in de graaf  $G$  een veelvoud is van  $T$ , levert dit een periodieke potentiaal op voor elk event en dus voor het tijdstip waarop het event plaatsvindt. Dit is als volgt te formuleren:

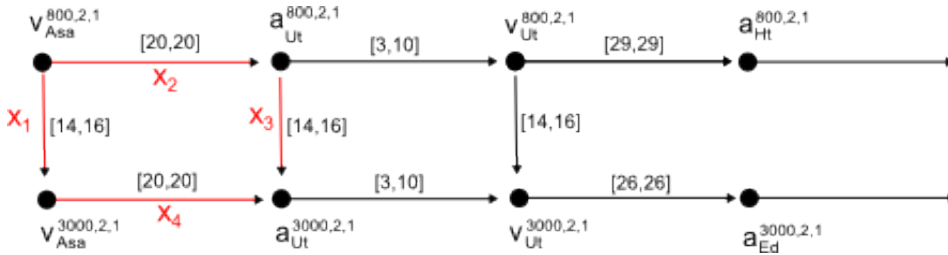
$$\sum_{a \in C^+} x_a - \sum_{a \in C^-} x_a = Tq_c, \quad (3.3.5)$$

voor alle cyclen  $C \in G$ , met integer variabele  $q_c$ . De verzameling  $C^+$  is de verzameling van kanten die met de cykel richting mee gaan en de verzameling  $C^-$  is de verzameling kanten die met tegen de richting van de cykel in gaan.

In het voorbeeld van de PESP representatie door een graaf hebben we in figuur 3.3.2 een cykel geselecteerd. Bij de CPF formulering moet dus gelden dat  $x_1 - x_2 - x_3 + x_4$  een veelvoud is van  $T$ .  $x_2$  en  $x_3$  worden afgetrokken omdat de richting van de pijl de andere kant op is. In deze situatie is het alleen mogelijk dat de som gelijk is aan  $T$  in het geval dat  $x_1 = x_3$ .

### 3.3.2 Transformatie van het PESP naar CPF

Om de PESP formulering om te zetten naar de CPF formulering, moeten de tijdsrestricties worden omgezet in periodieke spanningen  $x_a = \nu_j - \nu_i + Tp_a$ . Omdat alle tijdsrestricties zijn gedefinieerd als  $l_{ij} \leq \nu_j - \nu_i + Tp_{ij} \leq u_{ij}$ , is hiervoor weinig aanpassing nodig. Dit resulteert in de restrictie  $l_a \leq x_a \leq u_a$ .



Figuur 3.3.2: PESP representatie door een graaf met cykel

Een soort restrictie is echter niet eenvoudig om te zetten: dit zijn de symmetrierestricties. Deze restrictie was dan ook niet geformuleerd in termen van de standaard PESP formulering. De aanpak die we hiervoor gebruiken is uitgelegd in paragraaf 3.3.4.

Naast de restricties die omgezet moeten worden uit de PESP formulering, is er een extra restrictie nodig om de periodiciteit te behouden. Dit gebeurt op basis van cyclen in de graaf  $G$ , waarbij de som van alle spanningen in een cykel een veelvoud moet zijn van  $T$ . Deze cyclen moeten eerst gekozen worden, zodanig dat elke spanning er in voorkomt. Nadat deze cyclen zijn geselecteerd, kan de periodiciteit vereist worden met de restrictie  $\sum_{a \in C^+} x_a - \sum_{a \in C^-} x_a = Tq_c$ . Hoe deze cyclen worden geselecteerd, wordt uitgelegd in paragraaf 3.3.3.

### 3.3.3 Cykel basis voor de CPF

Om periodiciteit te eisen moet voor elke cykel in de graaf  $G$  gelden dat de som van alle spanningen een veelvoud is van  $T$ . Het aantal cyclen in een graaf kan echter exponentieel groot zijn, waardoor het te complex is om dit voor iedere cykel te eisen. Het gebruik van cykel bases bij de CPF is daarom noodzakelijk.

Een cykel basis is een verzameling van cyclen in een graaf, waarbij alle cyclen in de graaf een unieke combinatie zijn van cyclen uit de cykel basis. Een cykel basis kan gegenereerd worden door eerst een opspannende boom te maken en dan een unieke cykel te creëren voor elke kant die niet in de opspannende boom zit. Door te eisen dat de som van de spanningen in elke cykel van een cykel basis een veelvoud is van  $T$ , kan impliciet vereist worden dat dit geldt voor alle cyclen.

Het is wel noodzakelijk dat de cykel basis een integrale cykel basis is [9]. Een cykel basis is een integrale cykel basis, wanneer elke cykel die niet in de cykel basis zit, een unieke integer lineaire combinatie is van de cyclen die wel in de cykel basis zitten. Wanneer er cykel periodiciteit is voor elke cykel in een integrale cykel basis, geldt deze cykel periodiciteit automatisch voor alle cyclen in de graaf.

Er kan veel variatie in de rekensnelheid zitten afhankelijk van de cykel basis die gebruikt wordt. Zo kan de gemiddelde grootte van de cyclen erg verschillen per cykel basis. Een juiste keuze van de cykel basis is dus van groot belang.

Een integrale cykel basis die gegenereerd is met behulp van een minimaal opspannende boom blijkt efficiënt te werken voor het optimaliseren van het plannen van een spoorwegdienstregeling [9]. Op deze manier wordt voor dit onderzoek een integrale cykel basis gegenereerd.

Voor deze integrale cykel basis, wordt dus eerst een minimaal opspannende boom met betrekking tot de gewichten van de kanten gegenereerd uit de graaf  $G$ . Daarna wordt een algoritme toegepast dat een fundamentele cykel basis genereert [1], wat tegelijkertijd ook een integrale cykel basis is. Het algoritme is als volgt:

---

**Algoritme 3.3** Fundamentele cykel basis

---

Input: Ongerichte graaf  $U = (N, E)$ , opspannende boom  $H = (N_H, E_H)$ , gewicht van de kanten  $\omega_e$ .  
Output: Fundamentele cykel basis  $B$ .  
Sorteer alle kanten in  $E_H$  op niet-dalend gewicht.  
for alle kanten  $\{i, j\} \notin E_H$  do  
     $E = E \setminus \{i, j\}$ .  
    Bereken de kortste pad  $P_{ij}$  in  $U$  met betrekking tot  $\omega_e$ .  
    Cykel  $C = \{i, j\} + P_{ij}$ .  
    Voeg cykel  $C$  toe aan cykel basis  $B$ .

---

In alle cyclen uit deze cykel basis wordt in het model periodiciteit vereist, waardoor er periodiciteit ontstaat in de hele dienstregeling.

### 3.3.4 Symmetrie

Omdat de symmetrie niet geformuleerd is als een standaard PESP restrictie, kan deze restrictie niet eenvoudig worden omgezet. Om symmetrie in de gehele dienstregeling te vereisen zijn hiervoor meerdere mogelijkheden bij de CPF formulering.

Je zou een virtueel punt kunnen aanmaken en dan ieder event met dit punt verbinden. Door dan te vereisen dat de spanning tussen een event en het symmetriepunt gelijk is aan de spanning tussen het symmetriepunt en het symmetrisch tegenovergestelde event, ontstaat er symmetrie. Dit punt moet dan wel mee worden genomen in de graaf, waardoor er veel meer kanten in de graaf ontstaan. Dit is nadelig voor de rekensnelheid, omdat er voor elke extra kant een extra cykel komt in de cykel basis.

Verder is het mogelijk om de overstap- en halteertijden voor de heen- en terugreis aan elkaar gelijk te stellen. Hiervoor moeten wel voldoende overstappen tussen de verschillende treinseries zijn gedefinieerd, want anders kunnen treinen met weinig of geen overstaprestricties alsnog ten op zichte van de rest van de dienstregeling asymmetrisch worden gepland. Hiervoor worden dus geen extra knopen en kanten aan de graaf toegevoegd, wat een voordeel is voor de rekentijd ten opzichte van de vorige methode om symmetrie te vereisen.



Tot slot kunnen ook nog de opvolgtijden op elk station voor de heen- en terugreis aan elkaar gelijk gesteld worden. Hierdoor zorg je er automatisch voor dat de overstap- en halteertijden gelijk zijn, en ontstaat er symmetrie zonder dat er voldoende overstappen gedefinieerd moeten zijn. Ook deze methode heeft als voordeel dat er geen extra knopen en kanten aan de graaf worden toegevoegd. Dit kan in het model worden weergegeven met de restrictie  $x_{ij} = x_{j'i'} \forall (i, j) \in A_h$ , waar  $A_h$  de verzameling is met opvolgrestricties en  $x_{j'i'}$  de symmetrisch tegenovergestelde spanning is van  $x_{ij}$ .

### 3.3.5 Cutting plane toepassen

Het is mogelijk om de grenzen van de variabele  $q_c$  in te perken met behulp van een cutting plane methode [8]. Hierdoor kan de zoekruimte sterk gereduceerd worden. Door te kijken naar de laagst mogelijke procestijden en de hoogst mogelijke procestijden, is de minimum waarde  $a_c$  en maximum waarde  $b_c$  van  $q_c$  vast te stellen. Deze waarden zijn als volgt te berekenen:

$$a_c = \left\lceil \frac{1}{T} \left( \sum_{(i,j) \in C^+} l_{ij} - \sum_{(i,j) \in C^-} u_{ij} \right) \right\rceil, \quad (3.3.6)$$

$$b_c = \left\lfloor \frac{1}{T} \left( \sum_{(i,j) \in C^+} u_{ij} - \sum_{(i,j) \in C^-} l_{ij} \right) \right\rfloor. \quad (3.3.7)$$

Bij  $a_c$  wordt afhankelijk van de richting van de pijl, steeds het minimum van de pijl opgeteld of het maximum van de pijl afgetrokken. Bij  $b_c$  wordt steeds het maximum van de pijl opgeteld of het minimum van de pijl afgetrokken. Deze som wordt gedeeld door  $T$  en afgerond, omdat de totale cykeltijd gelijk moet zijn aan een veelvoud van  $T$ .

### 3.3.6 CPF modelformulering van het cyclische spoorwegdienstregeling probleem

Het mathematische programmeringsprobleem van het CPF kan als volgt geformuleerd worden:

---

#### Algoritme 3.4 MIP formulering van de CPF

---

Minimaliseer	$f(x, q),$	
zodanig dat	$l_a \leq x_a \leq u_a$	$\forall a \in A,$
	$\sum_{a \in C^+} x_a - \sum_{a \in C^-} x_a = Tq_c$	$\forall C \in B,$
	$a_c \leq q_c \leq b_c$	$\forall C \in B,$
	$x_{a_h} = x'_{a_h}$	$\forall a_h \in A,$
	$x_a \leq 0$	$\forall a \in A,$
	$q_c \in \mathbb{Z}$	$\forall C \in G.$

---

Hier is  $A$  de verzameling van restricties,  $B$  de verzameling van cykels in de cykel basis en  $G$  graaf met alle restricties. De oplossing van dit probleem geeft uiteindelijk de optimale procestijden tussen de events met betrekking tot de doelstellingsfunctie  $f(x, q)$ . Door een willekeurig punt vast te stellen op tijdstip  $t = 0$ , kunnen de overige tijdstippen van de events worden berekend aan de hand van de vastgestelde procestijden.

## Samenvatting hoofdstuk 3

- Het PESP is een formulering van het probleem om periodieke events te plannen.
- Het PESP kan gerepresenteerd worden door een graaf  $G = (N, A, l, u)$ , met knopen als events, kanten als relaties tussen de events en  $l$  en  $u$  respectievelijk de onder- en bovenlimieten van de relatie tussen twee events.
- Het PESP is toepasbaar op het probleem om spoorwegdienstregelingen te plannen, met de aankomst- en vertrektijden van treinen als periodieke events.
- De CPF is een formulering die te transformeren is uit het PESP en is volgens eerder onderzoek een efficiëntere formulering voor het plannen van een spoorwegdienstregeling.
- De CPF is een formulering gebaseerd op procestijden, dit zijn de tijden tussen de events.
- Alleen wanneer de som van alle procestijden in elke cykel een veelvoud is van  $T$ , levert dit een cyclische dienstregeling op.
- Omdat er exponentieel veel cycli zijn in een graaf, is een integrale cykel basis noodzakelijk voor de CPF.
- Door periodiciteit in elke cykel van een integrale cykel basis te vereisen, is er periodiciteit in elke cykel van de graaf.
- De integrale cykel basis wordt voor dit model gegenereerd met behulp van een minimaal opspannende boom.
- Met behulp van een cutting plane methode kan de zoekruimte worden gereduceerd.



## Hoofdstuk 4

# Eigenschappen van het model

In dit hoofdstuk wordt uitgelegd wat precies de eigenschappen van het model zijn. Verder wordt er beschreven welke aannamen er gemaakt zijn, welke restricties in het model zitten en hoe deze in het model zijn verwerkt. Tenslotte worden de doelstellingsfuncties van het model uitgelegd.

### 4.1 Aannamen

Voor het model worden een aantal dingen aangenomen. Deze aannamen worden in dit deelhoofdstuk uitgelegd.

#### 4.1.1 Infrastructuur

Voor het plannen van de dienstregeling is het belangrijk om te weten wat de infrastructuur is van het spoorwegnetwerk. Tussen de meeste trajecten ligt er dubbelspoor. Voor elke richting wordt er dan een spoor gebruikt. Er zijn echter trajecten waar een, drie, vier of zes sporen liggen. Bij enkelsporige trajecten moet er rekening mee worden gehouden waar er wordt gekruist. Dit gebeurt dan meestal op een station waar het tijdelijk dubbelsporig is.

Driesporige trajecten komen voor bij enkele stations en bij splitsingen. Hierdoor is het mogelijk dat er twee treinen naar één richting vertrekken of van één richting aankomen. Voor de simpliciteit wordt aangenomen dat de driesporige trajecten in de buurt van de stations dubbelsporig zijn, omdat het anders erg complex is om in het model te bouwen dat het spoor ook voor twee richtingen gebruikt kan worden.

Bij viersporige trajecten is het mogelijk om in beide richtingen twee treinen te laten rijden. Het efficiëntst zou zijn om de langzame treinen op bijvoorbeeld de binnenste sporen te laten rijden, en de snelle treinen op de buitenste sporen. Hierdoor wordt het spoor optimaal gebruikt omdat de snelle treinen geen last hebben van langzame treinen die ervoor rijden. In de praktijk is dit echter niet altijd het geval, omdat men ook rekening houdt met de kruisingen die

de trein moet maken. Dus vaak rijden de treinen die uiteindelijk dezelfde bestemmingsrichting hebben op hetzelfde spoor en wordt er geen rekening gehouden met wat voor type trein het is.

Op de hele drukke trajecten liggen er soms ook zes sporen naast elkaar, bijvoorbeeld tussen Amsterdam Muiderpoort en Amsterdam Sloterdijk. De treinen rijden hier grotendeels gescheiden op basis van de uiteindelijke richting waar ze heen rijden. Hierdoor hoeven de treinen elkaar niet meer te kruisen op de punten waar het spoor zich splitst.

### 4.1.2 Treinseries

Bij het plannen van de lijnen zijn verschillende treinseries vastgesteld. Per treinserie is vastgesteld hoeveel keer per uur deze rijdt en op welk traject deze rijdt. Bij enkele treinseries in de huidige dienstregeling is de heenreis niet precies hetzelfde als de terugreis. Er kan bijvoorbeeld op de heen- of terugreis een extra station zijn waar de trein stopt. In het model wordt aangenomen dat de heen- en terugreis hetzelfde is. Verder wordt er dus aangenomen dat bekend is welke treinen rijden en waar ze stoppen.

Bij de lijnplanning wordt ook bepaald wat voor type materieel er rijdt voor een treinserie. Voor het plannen van de dienstregeling zijn de treinen in twee soorten te verdelen die van belang zijn. Als eerste de Intercitytreinen, die alleen stoppen op de stations in de grote steden. De tweede soort zijn de Sprinters. Deze treinen stoppen ook op kleine stations.

Naast dat deze twee soorten treinen stoppen op verschillende stations, is er ook een verschil in maximumsnelheid. Hierdoor zullen deze treinen ook vaak een andere rittijd hebben tussen hetzelfde traject. In de volgende paragraaf wordt hier meer over beschreven.

### 4.1.3 Vaste rittijden

In de huidige dienstregeling is het mogelijk dat de duur van de heen- en terugreis varieert. Ook hoeft de ritduur tussen hetzelfde traject van hetzelfde type materieel niet altijd hetzelfde te zijn. Soms heeft het er mee te maken dat de trein op één richting bijvoorbeeld vaker moet kruisen. En omdat er buffers zitten in de rittijd om vertragingen op te kunnen vangen, kunnen ze flexibel zijn met de rittijden, waardoor het makkelijker is om treinen in te plannen.

In de literatuur zijn er al verschillende benaderingen geweest om variabele rittijden in het model op te nemen, om zo de oplossingsruimte te vergroten. Het model in dit onderzoek neemt echter aan dat de rittijd tussen twee stations voor beide richtingen vaststaat, afhankelijk van het type materieel.

### 4.1.4 Variabele halteertijden

In tegenstelling tot de rittijden, zijn de halteertijden wel variabel in dit model. Ook in de huidige dienstregeling is dit het geval. Wel heeft het de voorkeur

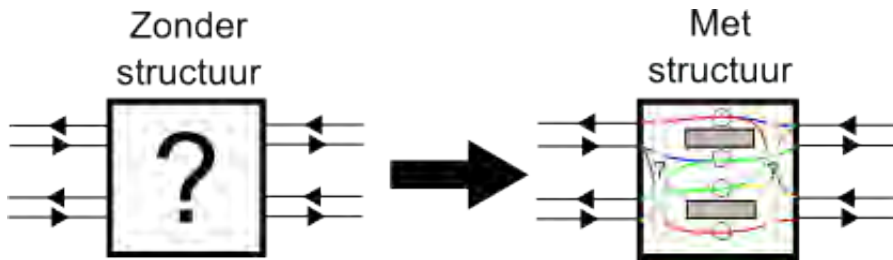
dat de halteertijd op de heen- en terugreis wel hetzelfde is, anders kan de dienstregeling niet exact symmetrisch zijn.

Voor de halteertijden zijn minimumnormen vastgesteld, afhankelijk van de grootte van de stations, het aantal mensen dat in- en uitstappen en het type materieel. Deze norm varieert tussen de 0 en 3 minuten. Door de halteertijden kort te houden wordt er op kosten bespaard en wordt de ritduur voor de reiziger korter. Daarom zal het model sturen op zo kort mogelijke halteringstijden.

#### 4.1.5 Stationsstructuur

In het model wordt in eerste instantie geen rekening gehouden met de structuur van de infra binnen de stations. De stations worden als een black box gezien. Hoe de treinen binnen de stations gerouteerd worden en de vraag of dat überhaupt mogelijk is, wordt nog in het midden gelaten. In het huidige model CADANS zijn ook niet alle details binnen een station meegenomen, waarna het routeringsprobleem binnen het station in de volgende stap wordt opgelost met behulp van STATIONS.

In tweede instantie zijn een groot aantal details aan het model toegevoegd. Door elk perron als apart aankomst- of vertrekpunt te modelleren, is het mogelijk rekening te houden met de capaciteit van het station en bovendien zijn de veiligheidsvoorwaarden nauwkeuriger te modelleren. Met de kruisingen wordt echter geen rekening gehouden. Om de hele stationsinfrastructuur te modelleren, moeten veel details in het model worden opgenomen. Zie figuur 4.1.1 voor een schematische tekening van waar het model rekening mee houdt als er wel of geen structuur binnen het station is gemodelleerd.

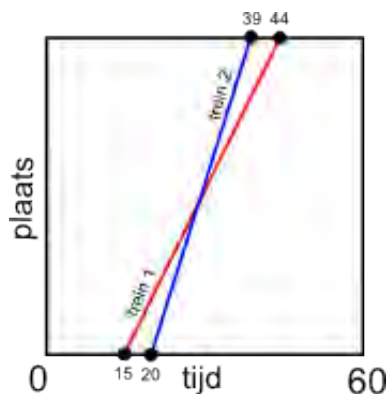


Figuur 4.1.1: Schematische tekening met en zonder structuur binnen een station

#### 4.1.6 Volgorde van treinen

Er wordt aangenomen in het model dat treinen elkaar niet inhalen. De treinen in Nederland halen elkaar bijna nooit in, dus de volgordes waarin de treinen rijden veranderen bijna nooit. In dit model wordt voor de PESP formulering met behulp van de  $p_{ij}$  variabele het verschil tussen twee events teruggerekend naar het tijdsinterval  $[0, T - 1]$ . Impliciet zegt deze variabele iets over de volgorde tussen de treinen. Wanneer de variabele  $p_{ij}$  voor events tussen twee treinseries

verandert, betekent dit automatisch dat de volgorde is veranderd. Zie figuur 4.1.2 waar treinen elkaar inhalen.



Figuur 4.1.2: Inhalen van treinen

Restricties van de opvolgtijden van de aankomst- en vertrektijden zien er als volgt uit:

$$3 \leq v_{trein2} - v_{trein1} + T p_{trein1,trein2} \leq 57, \quad (4.1.1)$$

$$3 \leq a_{trein2} - a_{trein1} + T p_{trein1,trein2} \leq 57. \quad (4.1.2)$$

Door de aankomst- en vertrektijden uit figuur 4.1.2 in te vullen, zijn de waarden van  $p_{ij}$  in beide gevallen te berekenen als  $T = 60$ :

$$20 - 15 + 0T = 5, \quad (4.1.3)$$

$$39 - 44 + 1T = 55. \quad (4.1.4)$$

De variabele  $p_{ij}$  is dus in het eerste geval 0 en in het tweede geval 1. Op deze manier hebben de treinen elkaar ingehaald en wordt nog steeds aan de restricties voldaan.

Om te voorkomen dat de volgordes tussen treinseries veranderen, is de variabele  $p_{ij}$  vastgesteld voor ieder paar van treinseries in dezelfde richting en niet voor ieder paar van events. Hierdoor kunnen treinen elkaar niet inhalen, als gevolg van bijvoorbeeld een trein die een kortere rittijd heeft dan een andere trein.

Voor zowel de keertijd restricties als de enkelspoor restricties wordt echter een aparte variabele  $p_{ij}$  gebruikt, omdat het bij deze restricties om treinseries gaat die niet in dezelfde richting rijden.



## 4.2 Dienstregeling restricties

Om een dienstregeling te plannen, moet deze aan diverse restricties voldoen. Deze voorwaarden komen voort uit eisen aan de veiligheid, eisen aan het comfort van de reizigers en het personeel, en limieten van het materieel. In dit deelhoofdstuk zal worden uitgelegd welke restricties dit precies zijn, en hoe deze gemodelleerd worden.

Deze restricties worden uitgedrukt in de PESP formulering die uitgelegd is in deelhoofdstuk 3.2. Van elke restrictie zal een voorbeeld worden gegeven, waarbij de events worden weergegeven in de vorm

$$actie_{station}^{treinserie,richting,nummer}.$$

Hierbij geeft de actie aan of het gaat om de aankomst of vertrek van een trein, de treinserie geeft het serienummer aan, de richting geeft aan of het de heen- of terugreis is, het nummer geeft aan of het de eerste of tweede trein van een treinserie is in het uur en het station geeft de naam van het station weer. Het vertrek van de eerste (en enige) trein in het uur van treinserie 500 vanuit Den Haag Centraal in de heenrichting wordt bijvoorbeeld weergegeven als  $v_{Gvc}^{500,1,1}$ .

Het tijdsinterval waarin deze restrictie moet vallen, wordt als volgt weergegeven:  $[onderlimiet,bovenlimiet]_T$ . De  $T$  geeft aan dat dit een modulair tijdsinterval is. Voor het model met  $T = 60$  maakt het dus bijvoorbeeld niet uit of een trein 10 of 70 minuten later vertrekt. In het model wordt met behulp van de variabele  $p_{ij}$  teruggerekend naar het interval  $[0, T - 1]$ , zoals beschreven in deelhoofdstuk 3.2.

### 4.2.1 Rittijd

Voor elke rit staat de duur vast. Deze rittijd is voor een rit met hetzelfde vertrek- en aankomstpunt gelijk voor alle treinen van dezelfde soort, zoals bijvoorbeeld een Intercity. De rittijd is afhankelijk van de snelheid waarmee de trein over het spoor kan en mag rijden. De rit tussen Den Haag Centraal en Gouda van treinserie 500 in de heenrichting wordt weergegeven met de volgende restrictie:

$$a_{Gd}^{500,1,1} - v_{Gvc}^{500,1,1} \in [18, 18]. \quad (4.2.1)$$

Events van treinen binnen een treinserie in dezelfde richting kunnen altijd na elkaar, binnen het tijdsinterval  $[0, T - 1]$ , gepland worden. Het tijdsinterval waar deze restrictie aan moet voldoen hoeft dus niet modulair te zijn.

### 4.2.2 Halteertijd

De halteertijd is de duur dat een trein op een station stilstaat. Deze tijd moet zitten tussen een bepaald minimum en maximum. Dit minimum is vastgesteld op basis van de grootte van het station. Te korte wachttijden kunnen ervoor zorgen dat mensen bij de grote stations niet genoeg tijd hebben om in en uit te stappen. Lange wachttijden zijn ongewenst, omdat dit de totale reisduur

verlengt. Om aan te geven dat de trein in de heenrichting van treinserie 500 tussen 1 en 10 minuten moet halteren, wordt weergegeven met de volgende restrictie:

$$a_{Gd}^{500,1,1} - v_{Gd}^{500,1,1} \in [1, 10]. \quad (4.2.2)$$

Ook dit tijdsinterval hoeft niet modulair te zijn, omdat het hier dezelfde treinserie in dezelfde richting betreft.

### 4.2.3 Frequentie

De meeste treinen rijden twee keer per uur. Omdat het een uurlijkse dienstregeling is, is voor deze treinen vastgesteld dat voor alle ritten, de aankomst- en vertrektijden precies 30 minuten van elkaar verschillen. Voor bijvoorbeeld een trein van de treinserie 800, geldt de volgende restrictie:

$$v_{Mt}^{800,1,2} - v_{Mt}^{800,1,1} \in [30, 30]. \quad (4.2.3)$$

### 4.2.4 Keertijd

Op de eindbestemming van een traject zal een trein keren. De tijd tussen het bereiken van het eindpunt en het vertrekken van het beginpunt wordt de keertijd genoemd. Voor deze keertijd is een minimum van 5 minuten vastgelegd, voor het gereedmaken van het materieel en het comfort van het personeel.

In dit model wordt geëist dat een trein een keertijd heeft die tussen de 5 en 59 minuten zit. De bovengrens van 59 minuten is vastgesteld, omdat de dienstregeling cyclisch is. Wanneer een trein 60 minuten later vertrekt, betekent dit eigenlijk dat een trein 0 minuten later vertrekt en dus onmiddellijk keert. Er kan worden gekozen om een nieuwe trein te laten vertrekken, maar dit kost extra materieel en is dus onwenselijk. Voor de trein van treinserie 500 die keert bij Groningen geldt de volgende restrictie:

$$v_{Gn}^{500,2,1} - a_{Gn}^{500,1,1} \in [5, 59]_{60}. \quad (4.2.4)$$

De richting verandert van 1 naar 2 bij het keren. Ondanks dat de twee events dezelfde treinserie zijn, kunnen de events alsnog erg ver van elkaar gepland worden, omdat ze niet in dezelfde richting rijden. Daarom is hier, en bij de rest van de restricties, het tijdsinterval waarin de restrictie moet vallen modulair.

### 4.2.5 Opvolging

Treinen kunnen wanneer ze op hetzelfde spoor rijden elkaar nooit inhalen. Daarom moeten treinen die elkaar opvolgen, vanwege de veiligheid, minimaal een bepaalde tijd van elkaar rijden. Dit zorgt ervoor dat treinen elkaar niet kunnen tegenkomen. Om dit te bewerkstelligen, wordt een verschil van 3 minuten geëist bij de aankomst en vertrek op een bepaald station. In een dienstregeling die cyclisch is voor elk uur, zorgt een minimum opvolgtijd van 3 minuten

automatisch voor een maximum opvolgtijd van 57 minuten, omdat een verschil van 57 minuten tegelijkertijd een verschil van 3 minuten is. Deze opvolgtijden modelleren de veiligheidseisen die beschreven zijn in paragraaf 2.2.2.2.

Op het baanvak tussen Den Haag Centraal en Gouda rijden onder andere de treinseries 500 en 9800. Voor deze treinen zijn er dus opvolgrestricties voor zowel het vertrek van Den Haag Centraal als de aankomst bij Gouda. Deze opvolgrestricties zijn als volgt geformuleerd:

$$v_{Gvc}^{9800,1,1} - v_{Gvc}^{500,1,1} \in [3, 57]_{60}, \quad (4.2.5)$$

$$v_{Gvc}^{500,1,1} - v_{Gvc}^{9800,1,1} \in [3, 57]_{60}, \quad (4.2.6)$$

$$a_{Gd}^{9800,1,1} - a_{Gd}^{500,1,1} \in [3, 57]_{60}, \quad (4.2.7)$$

$$a_{Gd}^{500,1,1} - a_{Gd}^{9800,1,1} \in [3, 57]_{60}. \quad (4.2.8)$$

Omdat de rittijden van de treinen niet altijd gelijk zijn, kan het tijdsinterval voor deze restricties verder beperkt worden. Een rittijd tussen Den Haag en Gouda duurt 18 minuten voor treinserie 500 en 25 minuten voor treinserie 9800. Voor deze treinen kan hierdoor het tijdsinterval voor de restrictie verkleind worden.

Omdat het bekend is dat treinserie 9800 maximaal 3 minuten eerder dan treinserie 500 mag aankomen, en de rittijd 7 minuten langer duurt, moet de treinserie 9800 minimaal 10 minuten eerder dan treinserie 500 vertrekken. Wanneer de treinserie 9800 bijvoorbeeld 9 minuten eerder vertrekt, komt deze trein 2 minuten eerder dan treinserie 500 aan, wat te kort is. Dit betekent dat restricties 4.2.5 en 4.2.6 te schrijven zijn als:

$$v_{Gvc}^{9800,1,1} - v_{Gvc}^{500,1,1} \in [3, 50]_{60}, \quad (4.2.9)$$

$$v_{Gvc}^{500,1,1} - v_{Gvc}^{9800,1,1} \in [10, 57]_{60}. \quad (4.2.10)$$

En omdat bekend is dat treinserie 9800 minimaal 3 minuten later dan treinserie 500 moet vertrekken, moet de treinserie 9800 minimaal 10 minuten later aankomen dan treinserie 500. Daarom zijn restricties 4.2.7 en 4.2.8 te schrijven als:

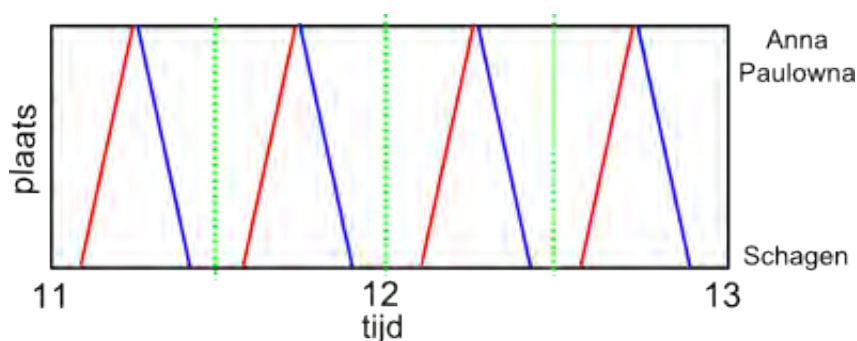
$$a_{Gvc}^{9800,1,1} - a_{Gvc}^{500,1,1} \in [10, 57]_{60}, \quad (4.2.11)$$

$$a_{Gvc}^{500,1,1} - a_{Gvc}^{9800,1,1} \in [3, 50]_{60}. \quad (4.2.12)$$

Tussen ritten met verschillende rittijden, wat vaak voorkomt als de treintypes verschillend zijn, kan het tijdsinterval van de restricties voor de opvolgtijden op deze manier dus verkleind worden.

## 4.2.6 Symmetrie

De huidige dienstregeling van de NS is symmetrisch. Dit wil zeggen dat alle treinen op zowel de heen- als terugreis dezelfde overstap-, rit- en halteertijden hebben, en dat deze tijden gespiegeld zijn in een symmetrie-as. Doordat de treinen in beide richtingen rijden, bestaat deze as om het half uur. In de huidige dienstregeling ligt deze symmetrie-as op het hele en het halve uur. Wanneer je nu bijvoorbeeld reist van Schagen naar Anna Paulowna, en je komt aan om 11:44, weet je dat er om 12:16 een trein vertrekt van Anna Paulowna richting Schagen. Zie figuur 4.2.1. Waar de groene stippellijn loopt ligt een symmetrie-as.



Figuur 4.2.1: Dienstregeling tussen Schagen en Anna Paulowna

In de huidige dienstregeling is symmetrie ontstaan doordat de overstap-, rit- en halteertijden ongeveer gelijk zijn op de heen- en terugreis. In veel gevallen zitten er echter kleine verschillen, en in enkele gevallen zelfs grote verschillen waardoor de dienstregeling niet compleet symmetrisch is. Symmetrie in de dienstregeling is dan ook niet een eis die wordt meegegeven aan het huidige model, maar een gevolg van de strakke overstap-, rit- en halteertijden die aan de restricties zijn meegegeven waardoor er weinig grote verschillen zijn tussen de heen- en terugreis.

Een symmetrische dienstregeling is een service voor de reiziger. Niet alleen omdat de tijd van de terugkerende trein te berekenen is aan de hand van de aankomsttijd, maar vooral omdat de reistijd op de heen- en terugreis hetzelfde is. Voor de reizigers met een directe verbinding zal de reistijd niet veel schelen, maar voor reizigers die een overstap in hun reis hebben kan dit veel schelen. Wanneer een overstap niet gehaald wordt kan dit in sommige gevallen bijna een extra uur reistijd kosten. Het is dus voor de reizigers prettig dat de dienstregeling symmetrisch is.

Efficiënt is een symmetrische dienstregeling echter niet. Symmetrie in de dienstregeling leidt tot suboptimaliteit, omdat de oplossingsruimte door symmetrie een stuk kleiner wordt. Hierdoor zullen bijvoorbeeld bij het optimaliseren naar zo kort mogelijke halteringstijden, er veel oplossingen worden weggegooid die een kortere totale halteringstijd hebben dan de totale halteringstijd bij de optimale oplossing voor een symmetrische dienstregeling.

Symmetrie in de dienstregeling is dus een service voor de reizigers wat ten koste gaat van de efficiëntie.

Voor het modelleren is het expliciet vereisen van symmetrie een voordeel. Doordat de oplossingsruimte verkleind wordt, wordt het probleem een stuk kleiner. Hierdoor kan het makkelijker worden een optimale oplossing te vinden, waardoor de rekentijd gereduceerd wordt [4]. Aangezien de huidige dienstregeling ongeveer symmetrisch is, kan het modelleren van de symmetrie in de dienstregeling de rekentijd reduceren, zonder dat er veel van de echte oplossingsruimte verloren hoeft te gaan. De dienstregeling is immers al symmetrisch. Aangezien het plannen van de dienstregeling complex is, is elke snelheidswinst van grote waarde. Daarom wordt in dit model de symmetrie gemodelleerd.

Aangezien alle events tussen  $[0, \tau]$  gepland worden, kan er een denkbeeldig symmetriepunt worden gemaakt op tijdstip  $\frac{\tau}{2}$ . Alle ritten op de heenreis vinden dan plaats in het interval  $[0, \frac{\tau}{2}]$ , en de ritten op de terugreis vinden plaats in het interval  $[\frac{\tau}{2}, \tau]$ . Door dan te eisen dat de som van het tijdstip van het event dat op de heenreis plaatsvindt en het tijdstip van het symmetrisch tegenovergestelde event dat op de terugreis plaatsvindt gelijk is aan  $2\frac{\tau}{2} = \tau$ , ontstaat er symmetrie in de dienstregeling. Omdat een compleet symmetrische dienstregeling erg beperkend is, wordt rekening gehouden met een marge, zodat de dienstregeling niet precies symmetrisch hoeft te zijn. De restrictie kan dan als volgt worden gemodelleerd:

$$v_{Gvc}^{500,1,1} + a_{Gvc}^{500,2,1} \in [\tau - \textit{SymmetrieMarge}, \tau + \textit{SymmetrieMarge}]. \quad (4.2.13)$$

Met deze restrictie ontstaat er symmetrie in de dienstregeling in de punten  $\tau \bmod T$  en  $(\tau + \frac{T}{2}) \bmod T$ . Deze restrictie is dus op een andere manier geformuleerd dan de standaard PESP formulering. Hierdoor is het ook niet mogelijk om deze restrictie in het huidige model CADANS mee te nemen.

#### 4.2.7 Enkelsporigheid

Sommige trajecten bestaan uit één spoor. In beide richtingen rijdt er dus in totaal één trein. Op deze trajecten mogen treinen elkaar op het spoor niet tegenkomen. Dit moet dan gebeuren bij de stations, waar wel twee sporen liggen.

Het traject tussen Anna Paulowna en Den Helder Zuid is bijvoorbeeld enkelsporig. Op dit traject rijdt de treinserie 3000. Om te voorkomen dat treinen elkaar op een enkelspoor tegenkomen moet aan de volgende restricties worden voldaan:

$$a_{Ana}^{3000,2,1} - v_{Ana}^{3000,1,1} \in [0, 59]_{60}, \quad (4.2.14)$$

$$v_{Hdz}^{3000,2,1} - a_{Hdz}^{3000,1,1} \in [0, 59]_{60}, \quad (4.2.15)$$

waarbij de variabele  $p$  die gebruikt wordt om terug te rekenen naar het tijdsinterval  $[0, T - 1]$  gelijk is voor zowel de eerste als de tweede restrictie. Met deze restricties wordt ten eerste vereist dat de heengaande trein eerder vertrekt uit Anna Paulowna dan de teruggaande trein aankomt in Anna Paulowna. Ten tweede wordt vereist dat de heengaande trein eerder aankomt bij Den Helder Zuid dan de teruggaande trein vertrekt uit Den Helder Zuid. Tot slot wordt vereist dat deze events plaatsvinden binnen  $T - 1$  tijdseenheden. Deze eisen zorgen er impliciet voor dat de treinen elkaar niet tegenkomen op dit traject.

Aangezien de rittijden vaststaan, kan restrictie (4.2.15) worden herschreven. Neem  $x$  als rittijd voor de heenreis tussen Anna Paulowna en Den Helder Zuid, en  $y$  als rittijd voor de terugreis tussen Den Helder Zuid en Anna Paulowna. Event  $v_{Ana}^{3000,1,1}$  kan dan worden herschreven als  $a_{Hdz}^{3000,1,1} - x$  en  $a_{Ana}^{3000,2,1}$  kan dan worden herschreven als  $v_{Hdz}^{3000,2,1} + y$ . Restrictie (4.2.14) kan daardoor ook worden geformuleerd als:

$$v_{Hdz}^{3000,2,1} + y - a_{Hdz}^{3000,1,1} + x \in [0, 59]_{60}, \quad (4.2.16)$$

wat hetzelfde is als:

$$v_{Hdz}^{3000,2,1} - a_{Hdz}^{3000,1,1} \in [0 - x - y, 59 - x - y]_{60}. \quad (4.2.17)$$

Door de grenzen van restrictie (4.2.15) met restrictie (4.2.17) te combineren, krijg je de volgende restrictie:

$$v_{Hdz}^{3000,2,1} - a_{Hdz}^{3000,1,1} \in [0, 59 - x - y]_{60}. \quad (4.2.18)$$

Dergelijke restricties volstaan om te eisen dat treinen elkaar niet tegemoetkomen op enkelsporige trajecten.

## 4.2.8 Synchronisatie

Wanneer er meerdere treinen rijden op een bepaald traject, is het gewenst dat deze treinen zo gelijk mogelijk in het uur rijden. Als er bijvoorbeeld vier treinen per uur rijden tussen Zwolle en Amersfoort, is het gewenst dat deze om het kwartier rijden. Door eisen te stellen aan hoeveel tijd er tussen de aankomst of vertrek van treinen van verschillende treinseries zit, worden de treinen gelijk over het uur verdeeld.

De treinserie 800 rijdt van Maastricht naar Alkmaar en de treinserie 3000 van Nijmegen naar Den Helder. Beide treinseries rijden twee keer per uur tussen Utrecht en Alkmaar. Door de treinen om het kwartier te laten rijden, worden de treinen tussen Utrecht en Alkmaar gelijk over het uur verdeeld. Met de volgende restricties rijden de treinen 14 tot 16 minuten na elkaar tussen het traject Utrecht en Alkmaar:

$$v_{Ut}^{800,1,1} - v_{Ut}^{3000,1,1} \in [14, 16]_{60}, \quad (4.2.19)$$

$$v_{Asa}^{800,1,1} - v_{Asa}^{3000,1,1} \in [14, 16]_{60}, \quad (4.2.20)$$

$$v_{Asd}^{800,1,1} - v_{Asd}^{3000,1,1} \in [14, 16]_{60}, \quad (4.2.21)$$

$$v_{Ass}^{800,1,1} - v_{Ass}^{3000,1,1} \in [14, 16]_{60}, \quad (4.2.22)$$

$$v_{Zd}^{800,1,1} - v_{Zd}^{3000,1,1} \in [14, 16]_{60}, \quad (4.2.23)$$

$$v_{Cas}^{800,1,1} - v_{Cas}^{3000,1,1} \in [14, 16]_{60}. \quad (4.2.24)$$

Voor de tweede treinen van de treinseries hoeven deze restricties niet te worden vastgesteld, aangezien de frequentie restricties ook zijn gedefinieerd.

### 4.2.9 Gekoppelde treinseries

Er zijn een aantal treinseries die gekoppeld zijn aan een andere treinserie. Na het bereiken van hun eindbestemming rijden deze treinen verder als een andere treinserie. Deze treinen moeten dan binnen een bepaalde tijd weer vertrekken. Een voorbeeld zijn de treinseries 1500 en 4500. De treinserie 1500 rijdt tussen Amsterdam Centraal en Amersfoort Schothorst. De treinserie 4500 rijdt tussen Amsterdam Centraal en Enkhuizen. Eigenlijk rijdt de trein dus tussen Amersfoort Schothorst en Enkhuizen. Om te zorgen dat de treinen aan elkaar gekoppeld zijn, zijn de volgende restricties geformuleerd:

$$v_{Ass}^{4500,1,1} - a_{Asd}^{1500,2,1} \in [3, 10]_{60}, \quad (4.2.25)$$

$$v_{Hvs}^{1500,1,1} - a_{Asd}^{4500,2,1} \in [3, 10]_{60}. \quad (4.2.26)$$

Met deze restricties wordt geëist dat de vertrekkende trein 3 tot 10 minuten vertrekt na aankomst van de aankomende trein. In de praktijk zal de trein 3 tot 10 minuten halteren op het station, en vervolgens verder rijden als andere treinserie.

### 4.2.10 Vleugeltreinen

Vleugeltreinen zijn treinen die gecombineerd worden aan een andere treinen die op een bepaald gedeelte van de reis hetzelfde traject volgen. Hierdoor kunnen twee treinseries rijden op hetzelfde traject, zonder dat er meer spoorcapaciteit vereist is. Om ervoor te zorgen dat een vleugeltrein op tijd gecombineerd kan worden, moet deze trein binnen een bepaalde tijd voor of na de andere trein aankomen. Ook moet er rekening gehouden worden met de tijd om de trein los te splitsen.

De treinserie 500 is tussen Den Haag en Groningen en tussen Utrecht en Zwolle gecombineerd met een vleugeltrein. Bij Utrecht wordt de treinserie 20500 gecombineerd of gesplitst. Bij Zwolle wordt de treinserie 10500 gecombineerd of gesplitst. De treinserie 20500 rijdt tussen Utrecht en Rotterdam. De treinserie 10500 rijdt tussen Zwolle en Leeuwarden. Om ervoor te zorgen dat er genoeg

tijd is om de treinen te combineren en te splitsen, zijn de volgende restricties opgesteld:

$$v_{Ut}^{500,1,1} - a_{Ut}^{500,1,1} \in [3, 10]_{60}, \quad (4.2.27)$$

$$v_{Ut}^{500,1,1} - a_{Ut}^{20500,1,1} \in [3, 10]_{60}, \quad (4.2.28)$$

$$v_{Ut}^{500,2,1} - a_{Ut}^{500,2,1} \in [3, 10]_{60}, \quad (4.2.29)$$

$$v_{Ut}^{20500,2,1} - a_{Ut}^{500,2,1} \in [3, 10]_{60}, \quad (4.2.30)$$

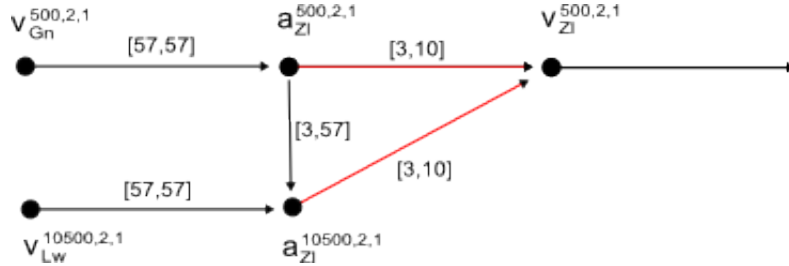
$$v_{Zl}^{500,2,1} - a_{Zl}^{500,2,1} \in [3, 10]_{60}, \quad (4.2.31)$$

$$v_{Zl}^{500,2,1} - a_{Zl}^{10500,2,1} \in [3, 10]_{60}, \quad (4.2.32)$$

$$v_{Zl}^{500,1,1} - a_{Zl}^{500,1,1} \in [3, 10]_{60}, \quad (4.2.33)$$

$$v_{Zl}^{10500,1,1} - a_{Zl}^{500,1,1} \in [3, 10]_{60}. \quad (4.2.34)$$

Zie figuur 4.2.2 voor een voorbeeld hoe deze restricties eruit zien in een graaf. De rode pijlen geven de restricties voor de vleugeltreinen weer. Daarnaast zijn er nog rittijd en opvolg restricties weergegeven in de graaf.



Figuur 4.2.2: Graaf met restricties voor vleugeltreinen

Door deze restricties vertrekt de gecombineerde trein minimaal 3 minuten nadat de tweede trein is aangekomen. Hierdoor is er voldoende tijd om treinen te combineren. Maximaal 10 minuten nadat de eerste trein is aangekomen vertrekt de trein, zodat de wachttijd niet te lang wordt. Voor het splitsen geldt hetzelfde. Bij aankomst van de gecombineerde trein, vertrekt de eerste trein minimaal 3 minuten later en vertrekt de tweede trein maximaal 10 minuten later.

Voor het combineren en splitsen van de treinen maakt het niet uit welke trein eerst komt, aangezien beide treinen voorop kunnen rijden en aan beide kanten gecombineerd kunnen worden. Deze restricties laten dan ook in het midden welke van de twee treinen als eerste aankomt en vertrekt.



### 4.2.11 Kruisingen

Op plaatsen waar het spoor zich splitst in meerdere richtingen, zullen treinen elkaar gaan kruisen. Ook hiervoor gelden de veiligheidseisen dat de treinen minimaal drie minuten na elkaar gebruik mogen maken van de kruising. Hierbij moet rekening worden gehouden met kruisingen van treinen in tegenovergestelde richting, maar ook met treinen die uit een andere richting komen en na de kruising van hetzelfde spoor gebruik maken.

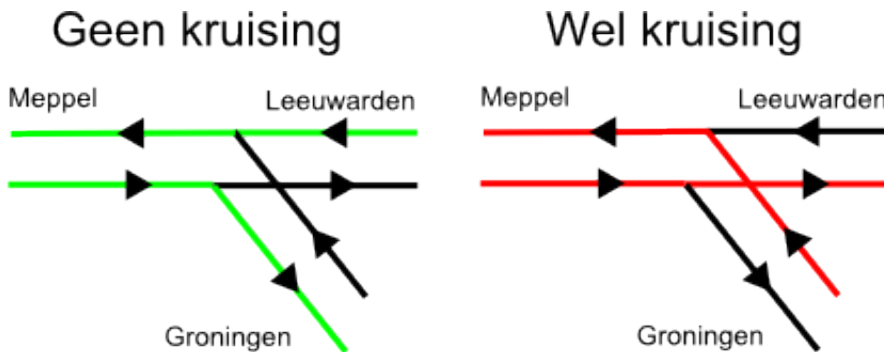
Deze kruisingen vinden vaak plaats binnen het station. Met deze kruisingen wordt geen rekening gehouden, omdat dit erg complex zou zijn. Vaak kunnen de kruisingen binnen het station op meerdere plaatsen plaatsvinden, waardoor het model erg gedetailleerd wordt als met alle opties rekening wordt gehouden.

Een aantal van deze kruisingen vinden buiten het station plaats. Dichtbij Meppel is bijvoorbeeld een splitsing richting Leeuwarden en Groningen. Deze splitsing ligt op ongeveer 3 minuten rijden van het station. Wanneer bijvoorbeeld de treinserie 500 uit Groningen en de treinserie 10500 uit Leeuwarden beide naar of vanaf Meppel rijden, moeten deze treinen minimaal 3 minuten van elkaar rijden. Dit is te modelleren met de volgende restricties:

$$v_{Mp}^{500,1,1} - v_{Mp}^{10500,1,1} \in [3, 57]_{60}, \quad (4.2.35)$$

$$a_{Mp}^{500,2,1} - a_{Mp}^{10500,2,1} \in [3, 57]_{60}. \quad (4.2.36)$$

Om rekening te houden met de treinen die in tegenovergestelde richting rijden bij het kruisen, is de rittijd tot het station voor de splitsing nodig. De rittijd tussen Meppel en de splitsing is 1 minuut. Omdat de treinen in Nederland rechts rijden, hoeft er alleen maar in één richting rekening worden gehouden met dat treinen kruisen, zie figuur 4.2.3.



Figuur 4.2.3: Splitsing zonder en met kruising van treinen

In dit voorbeeld kan hier rekening mee worden gehouden met de de volgende restrictie:

$$(a_{Mp}^{500,2,1} - 1) - (v_{Mp}^{10500,1,1} + 1) \in [3, 57]_{60}. \quad (4.2.37)$$

Met deze restrictie passeren de treinen minimaal 3 minuten na elkaar de kruising.

#### 4.2.12 Structuur van een station

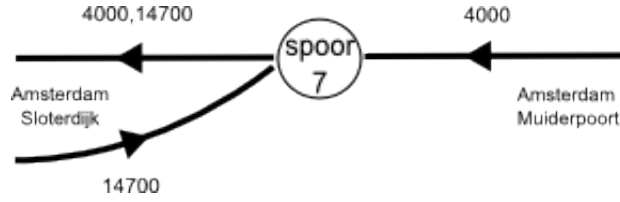
De structuur van een station wordt voor een deel meegenomen in het model. Voor de kleine stations is dit overbodig, maar voor de grote stations kunnen er veel meer details worden meegenomen. Hierdoor kunnen deze factoren worden meegenomen in het optimalisatieproces. De kans dat bij de gevonden planning de treinen binnen de stations gerouteerd kunnen worden, is door deze details mee te nemen groter dan bij het huidige model. Het is nog steeds nodig het routeringsprobleem binnen de stations op te lossen, aangezien de kruisingen van de treinen binnen de stations niet zijn meegenomen.

Het station wordt op perronniveau in het model verwerkt. Elk perron is eigenlijk een klein station dat onafhankelijk van de andere perrons opereert, waar treinen kunnen aankomen en vertrekken. Hierdoor hoeven treinen alleen rekening te houden met andere treinen die op dat perron aankomen en vertrekken. De capaciteit van het station zal dan ook niet kunnen worden overschreden, als er met de capaciteit op alle afzonderlijke stations rekening wordt gehouden. Dankzij de opvolgrestricties wordt hiermee rekening gehouden.

Deze modellering op perronniveau is echter alleen mogelijk als de treinen al toegewezen zijn aan een bepaald perron. Voor alle kleine en veel grote stations is het eenvoudig om te bepalen wat de beste perron toewijzing is. Bij Den Haag CS bijvoorbeeld zijn de perrons zo opgesteld dat ieder perron een eigen richting heeft. Hierdoor is de optimale perron toewijzing vooraf makkelijk te bepalen. Voor sommige grote stations zijn er echter zoveel mogelijkheden waarop de treinen kunnen worden toegewezen aan de perrons, dat dit afhangt van de rest van de dienstregeling. Door treinen van tevoren toe te wijzen aan de perrons, wordt de oplossingsruimte beperkt en zouden efficiëntere plannings met andere toewijzingen kunnen worden gemist. Aangezien de optimale toewijzing voor de meeste stations eenvoudig te bepalen zijn, en er verschillende plannings kunnen zijn die optimaal zijn, is het onduidelijk of het van tevoren toewijzen van het perron beperkend is.

Voor het toewijzen van de perrons en het opstellen van de restricties is het belangrijk om te weten welk in- en uitrijspoor de trein gaat gebruiken. Speciaal bij de grote stations waar er vaak meersporige trajecten zijn is dit noodzakelijk, om de restricties op te stellen. Hiermee kan worden bepaald aan welke veiligheidseisen de treinen moeten voldoen.

Een voorbeeld waar deze modellering verschilt met de modellering zonder stationsstructuur is bij de treinseries 4000 en 14700 bij het station Amsterdam Centraal. De treinserie 4000 komt aan op spoor 7 vanuit Amsterdam Muiderpoort, de treinserie 14700 komt aan op spoor 7 vanuit Zaandam en keert weer richting Zaandam. Zie figuur 4.2.4.



Figuur 4.2.4: Situatie spoor 7 Amsterdam Centraal

Hoewel deze treinen uit verschillende richtingen komen, moeten de events allemaal rekening met elkaar houden, omdat ze gebruik maken van hetzelfde perron. De restricties die hiervoor worden opgesteld zijn in feite opvolgrestricties:

$$a_{Asd}^{4000,2,1} - a_{Asd}^{14700,1,1} \in [3, 57]_{60}, \quad (4.2.38)$$

$$a_{Asd}^{4000,2,1} - v_{Asd}^{14700,2,1} \in [3, 57]_{60}, \quad (4.2.39)$$

$$v_{Asd}^{4000,2,1} - a_{Asd}^{14700,1,1} \in [3, 57]_{60}, \quad (4.2.40)$$

$$v_{Asd}^{4000,2,1} - v_{Asd}^{14700,2,1} \in [3, 57]_{60}. \quad (4.2.41)$$

Dan zijn er ook voorbeelden waarbij treinen wel over hetzelfde spoor rijden maar niet hetzelfde perron gebruiken, of treinen die zowel hetzelfde spoor als hetzelfde perron gebruiken. Al deze gevallen moeten gemodelleerd worden met opvolgrestricties. Hierdoor wordt gedeeltelijk rekening gehouden met de structuur van een station op perronniveau.

## 4.3 Doelstellingen van het model

Met dit model is het mogelijk om te optimaliseren naar een bepaalde doelstellingsfunctie. Bij het maken van een dienstregeling zijn de volgende aspecten belangrijk: de efficiëntie, de service en de robuustheid van de dienstregeling. Er zijn verschillende doelstellingsfuncties mogelijk die een of meerdere van deze aspecten nastreven. Voorbeelden hiervan zijn het minimaliseren van de halteertijden, het minimaliseren van de kosten, en het maximaliseren van de robuustheid van de dienstregeling.

### 4.3.1 Minimalisatie halteertijden

In dit onderzoek hebben we voor een doelstellingsfunctie gekozen die minimaliseert naar de halteertijden. Dit zorgt ervoor dat de service voor de klant verbeterd wordt, aangezien de reistijd van de directe lijnen geminimaliseerd wordt. Ook zorgt dit voor lagere kosten aangezien het materieel minder lang halteert, waardoor het materieel en personeel efficiënter kan worden ingezet.

Door de halteertijden te minimaliseren, neemt de robuustheid van de dienstregeling af. De kortere halteertijden gaat dan ten koste van de buffer die er was om vertragingen op te vangen. Er wordt echter al standaard een buffertijd meegenomen in de rittijd, die deze vertragingen kunnen opvangen. Bovendien is het misschien mogelijk deze buffertijd te vergroten, waardoor na minimalisatie van de wachttijden, de reistijden alsnog verbeteren en robuustheid van de dienstregeling ook is verbeterd.

De doelstellingsfunctie die geminimaliseerd wordt ziet er als volgt uit:

$$f(\nu, p) = \sum_{(i,j) \in A_h} (\nu_j - \nu_i), \quad (4.3.1)$$

waar  $A_h$  de verzameling van de halteerrestricties is.

### 4.3.2 Minimalisatie gewogen halteertijden

In dit onderzoek zullen we ook minimaliseren naar gewogen halteertijden. Hierbij wordt rekening gehouden met het aantal mensen dat in de trein zit tijdens het halteren. Een volle trein zal dan een hogere prioriteit krijgen om minder lang te stoppen dan een lege trein. Hierdoor wordt de reistijd per passagier korter, waardoor de service voor de klant verbeterd wordt. Met de volgende doelstellingsfunctie is het mogelijk om te minimaliseren naar gewogen halteertijden.

$$f(\nu, p) = \sum_{(i,j) \in A_h} r_{ij}(\nu_j - \nu_i), \quad (4.3.2)$$

waar  $r_{ij}$  het aantal reizigers is dat in de trein wacht op het moment dat de trein halteert tussen  $i$  en  $j$ .

## Samenvatting hoofdstuk 4

- Er wordt aangenomen dat de rittijden zijn gegeven en dat de halteertijden gevarieerd kunnen worden.
- De meeste restricties zijn uitgedrukt in de standaard PESP formulering. Restricties voor de rittijd, de halteertijd, de frequentie en de symmetrie wijken hier echter van af.
- De expliciete eis van de symmetrie in het model beperkt de oplossingsruimte, maar verkort de rekentijd.
- De volgorde van de treinen wordt vastgezet met behulp van de variabele  $p_{ij}$ .
- De stationsinfrastructuur is tot perronniveau gemodelleerd. De treinen moeten dan wel van tevoren worden toegewezen aan perrons, wat beperkend kan zijn voor de oplossingsruimte.
- De doelstellingsfunctie van het model minimaliseert de halteertijden of minimaliseert de gewogen halteertijden aan de hand van reizigersaantallen.



# Hoofdstuk 5

## Resultaten

In dit hoofdstuk wordt eerst beschreven welke datasets worden gebruikt. Daarna worden de resultaten beschreven die uit het model zijn gekomen. Hierbij zijn de MIP formuleringen van het PESP en de CPF opgelost met IBM ILOG CPLEX 12.1.0 in het programma IBM ILOG OPL IDE 6.3.

De computer die hiervoor gebruikt is heeft een quad-core processor geklokt op 3,00GHz en bevat 3,25GB geheugen. CPLEX maakte gebruik van drie processors, omdat dit in veel gevallen effectiever bleek te zijn dan vier processors. Verder is de optie om geheugen te besparen ingeschakeld, omdat CPLEX anders in veel gevallen te veel geheugen nodig heeft. CPLEX zal automatisch stoppen met zoeken naar een oplossing wanneer 3600 seconden zijn verstreken of wanneer er een oplossing gevonden is binnen 1% van de optimale oplossing. Voor de rest zijn de standaardwaarden van CPLEX gebruikt.

### 5.1 Dataset

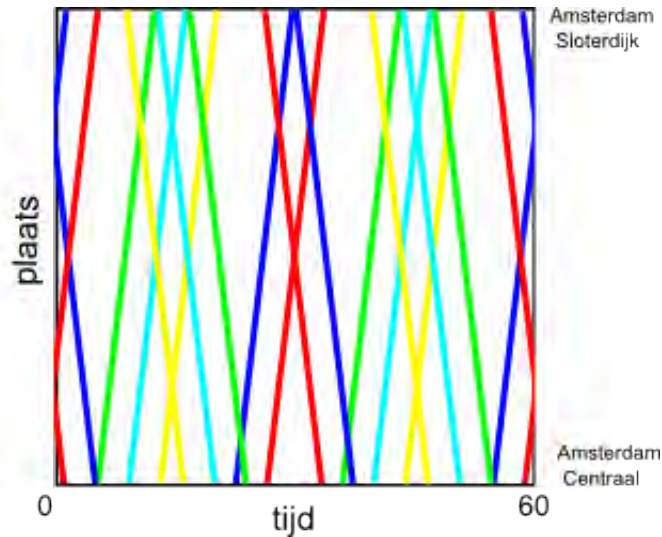
De datasets die worden gebruikt voor het model zijn gebaseerd op de dienstregeling van een dinsdag in november 2010. Alle treinen van de NS in de daluren worden uit deze dienstregeling meegenomen. Dit houdt dus in dat er geen regionale treinen, internationale treinen en goederentreinen worden meegenomen. Uit deze dienstregeling worden twee datasets gecreëerd.

De eerste dataset bestaat uit alle Intercity treinen. Dit zijn dus alle geplande Intercity treinen in de dienstregeling van een dinsdag in november 2010 in de daluren. Deze dataset bestaat uit 24 treinseries. In de resultaten zal naar deze dataset gerefereerd worden als het IC netwerk.

De tweede dataset bestaat uit alle NS treinen. Naast de 24 Intercity treinseries komen er ook nog 43 andere treinseries bij. Het grootste gedeelte van de treinen die er in de daluren op een dinsdag rijden zijn dan ingepland. Alleen de regionale treinen, internationale treinen en goederentreinen zijn dan niet ingepland. In de resultaten zal naar deze dataset gerefereerd worden als het NS netwerk. Zie appendix B voor een lijst met alle treinseries van deze datasets.

## 5.2 Resultaten

In eerste instantie waren er geen toegelaten oplossingen te vinden gegeven de restricties uit hoofdstuk 4. Door treinen de mogelijkheid te geven om te halteren op doorkomststations waren er wel plannings mogelijk. Voor alle doorkomststations was daarom een maximum halteertijd van 5 minuten ingesteld. De best gevonden oplossing van het model werd uiteindelijk weergegeven in een tijd-ruimte diagram. Zie figuur 5.2.1 voor een voorbeeld van een oplossing tussen Amsterdam Centraal en Amsterdam Sloterdijk.

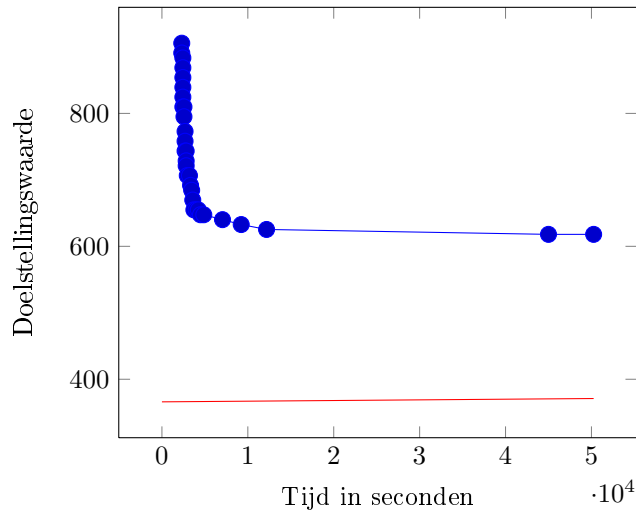


Figuur 5.2.1: Planning tussen Amsterdam Centraal en Amsterdam Sloterdijk

De formuleringen werden vergeleken onder verschillende aannamen. Tenzij anders is aangegeven, werd er aangenomen dat symmetrie vereist is, dat de stationsstructuur niet werd meegenomen en dat er geoptimaliseerd werd naar minimale halteertijden.

In de resultaten zal de tijd tot de eerste oplossing worden weergegeven en het verschil in procenten tussen de gevonden onder- en bovenlimiet. Omdat vooral het vinden van de eerste oplossing complex was, en omdat de oplossing daarna relatief snel leek te convergeren, geeft de tijd tot het vinden van de eerste oplossing een goede indicatie van hoe snel het probleem wordt opgelost. De onderlimiet leek ook snel te convergeren. Zie figuur 5.2.2 voor een voorbeeld van hoe de onder- en bovenlimiet die CPLEX vindt convergeert.





Figuur 5.2.2: Oplossingsproces van het onder- en bovenlimiet voor de PESP formulering met stationsstructuur

Het verschil in procenten tussen de gevonden onder- en bovenlimiet geeft aan hoeveel procent de gevonden oplossing maximaal van de optimale oplossing zit. De onderlimiet geeft namelijk de minimale oplossing van het probleem aan en de bovenlimiet geeft de gevonden oplossing aan.

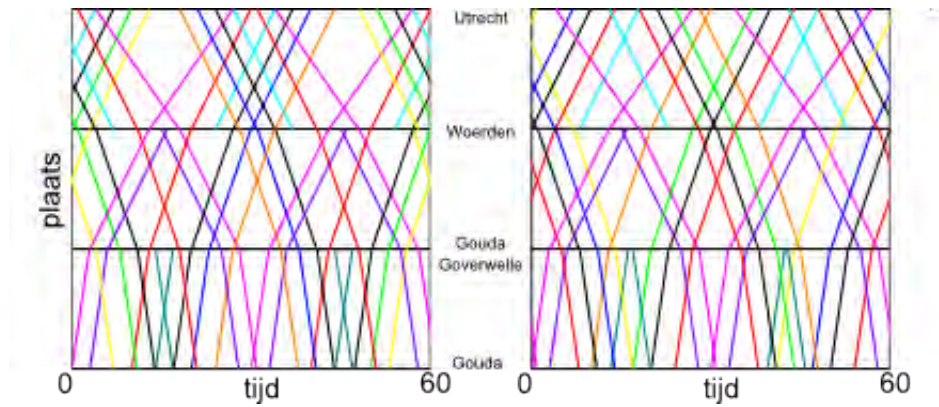
Omdat het model automatisch stopt met zoeken wanneer er 3600 seconden zijn verstreken, betekent een waarde van 3600 seconden tot de eerste oplossing dat er geen oplossing is gevonden. Voor het verschil in onder- en bovenlimiet wordt dan 100% weergegeven.

De resultaten zijn gebaseerd op één waarneming. Het meerdere keren oplossen van een instantie leverde resultaten op die wat betreft rekensnelheid en doelstellingswaarde dicht bij elkaar lagen. De plannings die berekend werden waren echter verschillend van structuur. Er waren meerdere structuren van de dienstregeling mogelijk om tot de beste oplossing te komen. Zie figuur 5.2.3 voor een voorbeeld van twee unieke optimale plannings tussen het traject Utrecht-Gouda.

### 5.2.1 Vergelijking PESP formulering en CPF

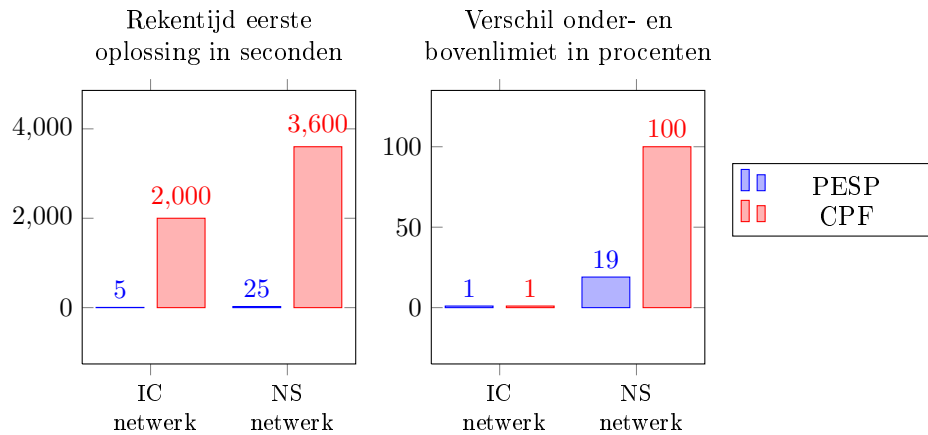
Eerst hebben we de PESP formulering met de CPF vergeleken. Zie figuur 5.2.4 voor de resultaten. Voor het berekenen van de eerste oplossing voor het IC netwerk had de PESP formulering veel minder tijd nodig. Wel lukte het beide formuleringen binnen 3600 seconden een oplossing te vinden die maximaal 1% boven de onderlimiet lag.

Voor het NS netwerk had de PESP formulering nog steeds weinig tijd nodig om een oplossing te vinden, maar voor de CPF bleek het onmogelijk om binnen



Figuur 5.2.3: Twee planningen voor het traject Utrecht-Gouda

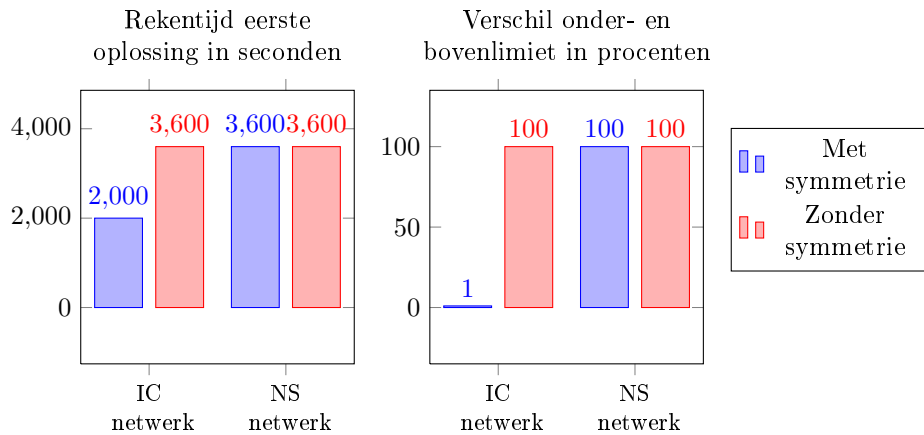
3600 seconden een oplossing te vinden. De oplossing die de PESP formulering na 3600 seconden vond, lag 19% boven de onderlimiet.



Figuur 5.2.4: PESP formulering en CPF formulering

## 5.2.2 CPF resultaten

Omdat de CPF veel langzamer bleek te zijn dan de PESP, werd bij de CPF formulering alleen gekeken naar verschillen als er wel of geen symmetrie werd vereist. Zie figuur 5.2.5 voor de resultaten. Waar de CPF met symmetrie nog na lange tijd een oplossing kon vinden in het IC netwerk, bleek dit voor deze formulering zonder symmetrie onmogelijk binnen 3600 seconden. Voor het NS netwerk was in beide gevallen niet mogelijk een oplossing te vinden binnen 3600 seconden.

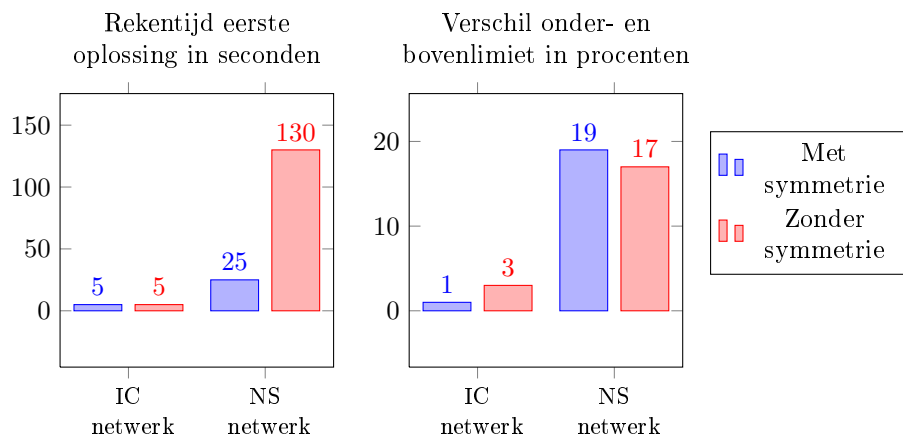


Figuur 5.2.5: CPF formulering met en zonder symmetrie

### 5.2.3 PESP resultaten

Ook voor de PESP formulering werd gekeken wat de verschillen zijn als er wel of geen symmetrie werd vereist, zie figuur 5.2.6. Het vinden van een oplossing in het IC netwerk was in beide gevallen even snel. Bij het NS netwerk zat er wel een groot verschil in de rekentijd: het kostte de formulering zonder symmetrie meer tijd om een oplossing te berekenen.

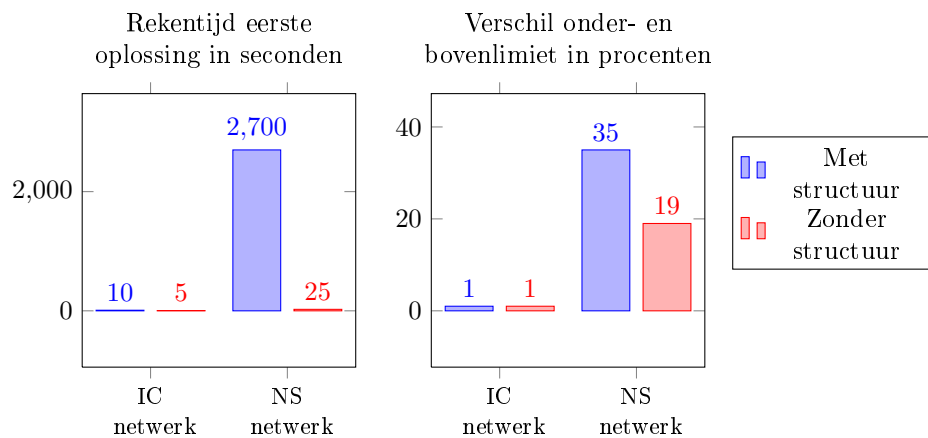
Een oplossing binnen 1% van de onderlimiet kon bij het IC netwerk voor de formulering met symmetrie wel gevonden worden. De oplossing voor de formulering zonder symmetrie lag na 3600 seconden 3% van de onderlimiet. Voor het NS netwerk werden oplossingen gevonden die 17% en 19% boven de onderlimiet lagen voor respectievelijk de formulering met en zonder symmetrie.



Figuur 5.2.6: PESP formulering met en zonder symmetrie

Daarnaast werd er vergeleken wat de verschillen zijn als de stationsstructuur wel en niet wordt gemodelleerd. Zie figuur 5.2.7 voor deze resultaten. De snelheid van het vinden van een oplossing voor het IC netwerk verschilde weinig, namelijk 5 seconden voor de formulering zonder stationsstructuur en 10 seconden voor de formulering met stationsstructuur. Voor het NS netwerk was het verschil veel groter. Zonder stationsstructuur was het mogelijk om in korte tijd een oplossing te vinden, maar met stationsstructuur duurde dit veel langer.

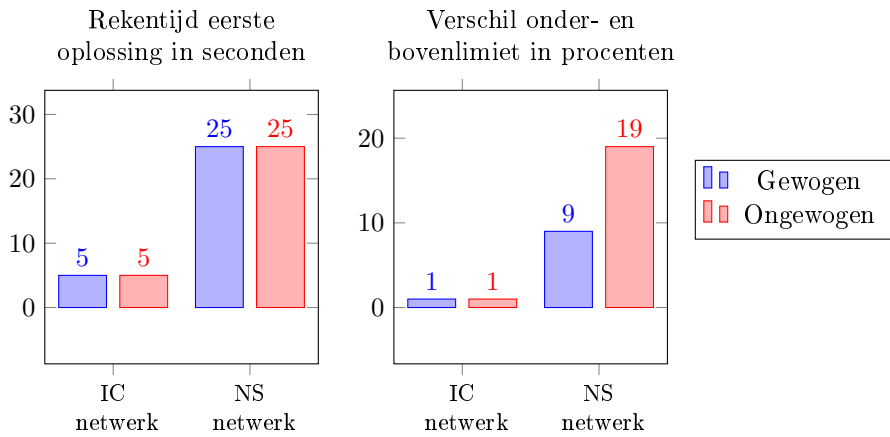
Voor het IC netwerk werden oplossingen gevonden die beide binnen 1% van de onderlimiet lag. Bij het NS netwerk waren er wel grote verschillen. De oplossing die de formulering zonder stationsstructuur vond lag 19% boven de onderlimiet, terwijl de oplossing die de formulering met stationsstructuur vond, 35% boven de onderlimiet lag.



Figuur 5.2.7: PESP formulering met en zonder stationsstructuur

Zie figuur 5.2.8 voor de resultaten van de vergelijking tussen de PESP formulering met en zonder gewogen halteertijden. Bij de formulering met gewogen halteertijden werd rekening gehouden met het aantal reizigers dat in de trein wacht op het moment van halteren.

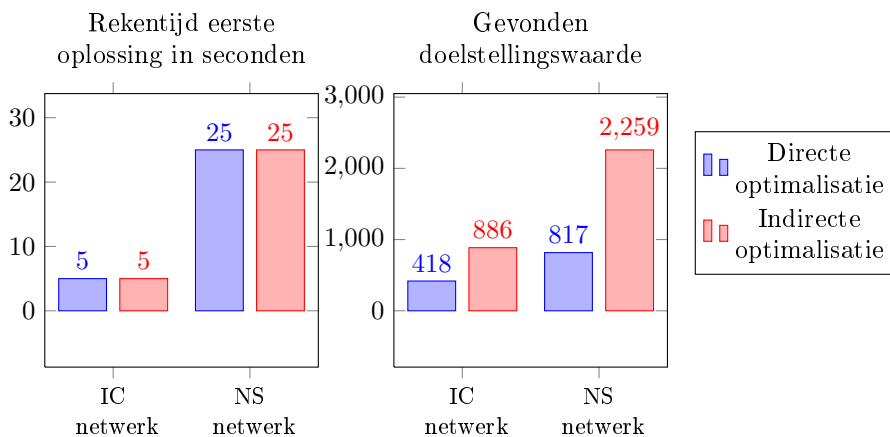
De snelheid van het oplossen van het IC netwerk en het NS netwerk bleek in beide gevallen even snel. Ook werd er voor het IC netwerk in beide gevallen een oplossing gevonden die binnen 1% lag van de onderlimiet. Voor het NS netwerk lag de oplossing van de formulering met gewogen halteertijden dichterbij de onderlimiet dan de oplossing die de formulering zonder gewogen halteertijden vond, namelijk respectievelijk 9% en 19% van de onderlimiet.



Figuur 5.2.8: PESP formulering met en zonder gewogen halteertijden

Tot slot werd de PESP formulering vergeleken wanneer er direct geoptimaliseerd werd of wanneer er pas nadat er een oplossing gevonden was geoptimaliseerd werd. In het laatste geval werd er eerst een toegelaten oplossing gevonden, waarna de treinvolgordes vast werden gezet en door te optimaliseren opnieuw een nieuwe oplossing gevonden werd. Zie figuur 5.2.9 voor de resultaten.

De snelheid voor het vinden van een oplossing was voor zowel het IC netwerk als het NS netwerk in beide gevallen gelijk. De gevonden doelstellingswaarden waren bij de directe optimalisatie echter veel lager en dus beter dan wanneer er indirect geoptimaliseerd werd. Voor het IC netwerk lag de oplossing van de indirecte optimalisatie 112% hoger dan de directe optimalisatie, en voor het NS netwerk was dit percentage 176%.



Figuur 5.2.9: PESP formulering met directe en indirecte optimalisatie

## Samenvatting hoofdstuk 5

- De eerste dataset bestaat uit alle Intercity treinen en de tweede dataset bestaat uit alle NS treinen, beide in de daluren.
- In eerste instantie is geen oplossing mogelijk, maar met toegelaten halteertijden op doorkomststations is dit wel mogelijk.
- In de resultaten worden de formuleringen onder verschillende aannamen met elkaar vergeleken.
- De tijd tot de eerste oplossing wordt gemeten voor een indicatie hoe snel het probleem oplosbaar is.
- Het verschil tussen de onder- en bovenlimiet van de oplossing wordt beschouwd als een indicatie van de kwaliteit van de gevonden oplossing.

## Hoofdstuk 6

# Conclusie en discussie

In dit hoofdstuk wordt beschreven wat de conclusies zijn van het onderzoek naar het optimaliseren van het plannen van een spoorwegdienstregeling. Er wordt antwoord gegeven op de onderzoeksvragen uit hoofdstuk 1 en er worden conclusies getrokken aan de hand van de resultaten. Daarnaast zal er een vergelijking worden gemaakt met andere onderzoeken. Tenslotte wordt er besproken welke onderwerpen interessant zijn voor verder onderzoek.

### 6.1 Conclusies

In dit onderzoek hebben we een model gebouwd dat het plannen van het BUP optimaliseert. Hiervoor hebben we twee verschillende formuleringen gebruikt: de PESP formulering en de CPF. Bij het uitvoeren van het model, bleek het in eerste instantie niet mogelijk om een toegelaten oplossing te vinden. Blijkbaar waren er restricties waar de dienstregeling niet aan kon voldoen. Restricties zoals de opvolgrestricties worden in de huidige dienstregeling niet altijd zo strak gevolgd als in dit model, wat kan verklaren waarom het niet mogelijk was een dienstregeling te vinden.

Om dit probleem op te lossen is in het model toegelaten dat ook op doorkomststations, waar men normaal gesproken niet stopt, het mogelijk is om een paar minuten te halteren. Hierdoor is het wel mogelijk om oplossingen te vinden. Met deze resultaten kunnen we de onderzoeksvragen beantwoorden. De hoofdonderzoeksvraag is als volgt:

*In hoeverre is het mogelijk het plannen van het BUP te optimaliseren naar verschillende doelstellingsfuncties?*

Het optimaliseren met de CPF bleek beperkt mogelijk. Al bij het plannen van de Intercity netwerk had het moeite om binnen korte tijd een oplossing te vinden. Wel zat de gevonden oplossing dichtbij de optimale oplossing. Bij het plannen van het netwerk met alle NS treinen kon er echter geen oplossing worden gevonden.

Met de PESP formulering werd veel sneller een oplossing gevonden. Ook met het netwerk met alle NS treinen kon snel een oplossing worden gevonden. Er kon echter niet binnen een uur worden bewezen dat de gevonden oplossing optimaal was en gezien de snelheid waarmee de onder- en bovenlimiet veranderden leek het ook niet waarschijnlijk dat dit binnen een lange tijd bewezen zou worden.

Het is dus mogelijk om te optimaliseren bij het plannen van het BUP. Ook bij de grote dataset die een groot deel van alle treinen in Nederland bevat, werden er in korte tijd oplossingen gevonden. Er kon echter niet worden bewezen of een van deze gevonden oplossingen optimaal is. Wel kon er worden bewezen dat de gevonden oplossing maximaal 19% van de optimale oplossing zit. Hoe de kwaliteit van de oplossing precies is kan dus niet gezegd worden.

Bij vergelijking met een alternatieve zoekmethode die gebruikt wordt in het model CADANS, namelijk eerst een toegelaten oplossing vinden en daarna postoptimalisaties toepassen, bleek het direct optimaliseren een veel betere oplossing op te leveren. Hoeveel beter de gevonden oplossing is met de directe optimalisatie, is afhankelijk hoe ruim de grenzen van de restricties zijn gesteld.

De deelvraag van dit onderzoek luidt als volgt:

*In hoeverre is het mogelijk om bij de planning van de dienstregeling rekening te houden met de routing van de treinen binnen de stations?*

Voor de CPF hebben we niet rekening gehouden met de routing van de treinen binnen stations, omdat deze formulering al moeite had zonder deze details. Voor de PESP formulering hebben we deze details wel ingebouwd. Door alle perrons mee te nemen is dit deels gelukt. Hierdoor wordt rekening gehouden met de capaciteiten van de perrons in een station. De kruisingen binnen de stations zijn echter niet meegenomen, omdat dit te gedetailleerd zou zijn voor dit model.

Een nadeel van deze details erin bouwen is dat alle treinen van tevoren een perron hebben toegewezen gekregen. Hiermee wordt de oplossingsruimte beperkt en worden mogelijk betere toewijzingen weggegooid. Het is de vraag hoe beperkend het vaststellen van de perron toewijzingen is voor het plannen van het BUP, aangezien in veel gevallen het eenvoudig te beredeneren is wat de optimale toewijzing is.

Ondanks dat het inbouwen van deze details het model een stuk complexer maakt, vindt het model nog steeds een oplossing. Het bewijzen van optimaliteit is zelfs sneller bij het Intercity netwerk. Het toevoegen van restricties kan dus een positief effect hebben op het model. Bij het netwerk met alle NS treinen kostte het echter veel meer tijd om een oplossing te vinden en was de gevonden oplossing 35% verwijderd van de gevonden onderlimiet voor de optimale oplossing. Dit ligt dus wel hoger dan de oplossing wanneer deze details niet zijn gemodelleerd, welke 19% scheelde met de gevonden onderlimiet. Het rekening houden van de routing van de treinen binnen de stations is op zekere hoogte gelukt in dit model, maar het is onduidelijk wat de kwaliteit van de oplossing is.

Naast deze onderzoeksvragen zijn er ook twee andere factoren onderzocht waar in eerste instantie niet de focus op lag, namelijk het expliciet vereisen



van symmetrie in het model en het optimaliseren naar minimale gewogen halteertijden. De bevindingen hierover worden beschreven in de volgende paragrafen.

### 6.1.1 Symmetrie

In beide formuleringen zijn er symmetriestructies opgesteld, en hierbij is gekeken wat de invloed ervan is op het model. In alle gevallen bleek het vinden van een oplossing minstens net zo snel of sneller te realiseren, maar ging dit wel ten koste van de oplossingsruimte. Het oplossen van het Intercity netwerk met de CPF bleek zelfs alleen mogelijk wanneer er symmetrie vereist werd. Zonder deze restrictie kon er binnen een uur geen oplossing worden gevonden.

### 6.1.2 Optimalisatie met gewogen halteertijden

Naast het optimaliseren naar minimale halteertijden, is er ook geoptimaliseerd naar gewogen halteertijden door reizigersaantallen mee te nemen. Het voordeel van deze methode is dat er dan rekening wordt gehouden met hoeveel mensen er in de halterende trein zitten. Met deze methode bleek het bij het Intercity netwerk veel makkelijker om maximaal 1% van de optimale oplossing te komen, en ook in het grote netwerk kon een oplossing worden gevonden die procentueel veel dichter lag bij de onderlimiet van de optimale oplossing.

## 6.2 Vergelijking met andere studies

In eerdere onderzoeken presteerde de CPF veel beter dan de PESP formulering voor het plannen van een spoorwegdienstregeling [9, 5]. In ons onderzoek komt echter precies het tegenovergestelde naar voren. Waardoor dit veroorzaakt wordt is niet geheel duidelijk en kan meerdere verklaringen hebben.

Computers worden steeds sneller en CPLEX blijft zich ontwikkelen. Dit zorgt ervoor dat er grotere datasets gepland kunnen worden dan vroeger. Dit komt duidelijk naar voren bij de PESP formulering. Een dergelijke dataset kon eerder niet binnen zo een korte tijd worden berekend en de limieten werden toen sneller bereikt. Een snellere computer en een verder ontwikkelde CPLEX draagt hier aan bij.

Het is daarom opmerkelijk dat de CPF zo traag is. Deze formulering bleek in eerdere gevallen beter te werken dan de PESP formulering, maar is nu veel trager. Al bij de dataset van de Intercity netwerk duurde het lang om een oplossing te vinden. Hoe deze resultaten zich precies verhouden met de eerdere resultaten is moeilijk te zeggen, omdat de datasets anders zijn. Misschien dat de verbeterde technieken van CPLEX de PESP formulering veel winst in de rekentijd oplevert en de CPF niet.

Verschillende bewerkingen aan de datasets zijn toegepast om het probleem makkelijker oplosbaar te maken. Een nadeel was dat door deze bewerkingen, de doelstellingsfunctie en de symmetriestructies moeilijker waren op te stellen.

Omdat deze bewerkingen niet voor zoveel verbetering zorgden dat deze formulering qua snelheid in de buurt kwam van de PESP formulering, zijn de resultaten niet meegenomen in dit onderzoek.

De verklaring zou ook gezocht kunnen worden in de manier waarop de formuleringen zijn geïmplementeerd. Er zijn verschillende manieren om de PESP formulering te modelleren. In dit onderzoek is er voor gekozen om alle events lineair in de tijd te plannen, maar het is ook mogelijk om alle events in het interval  $[0, T - 1]$  te plannen. De keuze voor de manier van implementatie zou veel voordeel kunnen hebben opgeleverd voor de rekentijd. Daarentegen zijn er misschien efficiëntere manieren om de CPF te implementeren, waardoor de CPF zoveel trager is dan de PESP formulering. Mogelijk zijn er andere cykel bases die minder rekentijd vereisen bij de geteste datasets.

Verskillende verklaringen zijn mogelijk en verder onderzoek zou kunnen verklaren waarom in dit onderzoek de PESP formulering zoveel beter presteert dan de CPF.

### 6.3 Suggesties voor verder onderzoek

Tijdens dit onderzoek hebben we een vergelijking met CADANS proberen te maken door de zoekmethode naar de oplossing te veranderen. De verschillen tussen de optimalisatie en de aangepaste zoekmethode waren groot, maar omdat CADANS de restricties nauwer heeft opgesteld komen deze resultaten niet overeen met de werkelijke situatie. Om echt een goede vergelijking te kunnen maken moet het model precies lijken op het model van CADANS. Pas dan is er een eerlijke vergelijking mogelijk. Met dit onderzoek kan duidelijk worden hoeveel voordeel er valt te behalen met het optimaliseren van het plannen van de dienstregeling.

Verder onderzoek naar waarom de CPF veel langzamer is dan de PESP formulering zou ook interessant zijn. Het is vreemd dat een formulering die in eerdere onderzoeken veel sneller was, in dit onderzoek veel trager is. Door te kijken naar bijvoorbeeld andere cykel bases zou deze formulering een stuk sneller te berekenen kunnen zijn.

## Samenvatting hoofdstuk 6

- Met het PESP model is het mogelijk om het plannen van een BUP te optimaliseren naar verschillende doelstellingsfuncties. Bewijzen dat de gevonden oplossing optimaal is, is voor het NS netwerk echter nog te complex.
- Het CPF model is veel langzamer dan het PESP model en heeft al moeite met het optimaliseren van het Intercity netwerk.
- Stationsinfrastructuur kon tot perronniveau in het model worden meegenomen, dit beperkt mogelijk wel de oplossingsruimte omdat de perrons van tevoren moeten worden toegewezen aan treinen.
- Het expliciet vereisen van symmetrie in het model zorgt voor snellere rekentijd maar beperkt de oplossingsruimte.
- Door te optimaliseren met gewogen halteertijden komt de gevonden oplossing dichterbij de gevonden onderlimiet.
- Het resultaat dat de PESP formulering sneller is dan de CPF komt niet overeen met eerdere onderzoeken.
- Om een vergelijking te maken met CADANS moet het model zo aangepast worden dat de restricties precies hetzelfde zijn opgesteld.
- Verder onderzoek naar de CPF is noodzakelijk om te verklaren waarom deze formulering veel langzamer is, mogelijk door te kijken naar andere cykel bases.



# Bibliografie

- [1] Berger, F., Gritzmam, P., De Vries, S. *Minimum Cycle Bases for Network Graphs*. Algorithmica, 40(1):51-62, 2004.
- [2] Caimi, G. *Algorithmic decision support for train scheduling in a large and highly utilised railway network*. PhD thesis, ETH Zurich, 2009.
- [3] Kroon, L., Huisman, D., Abbink, E., Fioole, P-J., Fischetti, M., Maróti, G., Schrijver, A., Steenbeek, A., Ybema, R. *The New Dutch Timetable: The OR Revolution*. Interfaces 39(1):6-17, INFORMS, 2009.
- [4] Liebchen, C. *Symmetry for Periodic Railway Timetables*. Electronic Notes In Theoretical Computer Science, 92(1):34-51, 2004.
- [5] Liebchen, C. *Periodic Timetable Optimization in Public Transport*. PhD thesis, Technische Universität Berlin, 2006.
- [6] Liebchen, C. *The First Optimized Railway Timetable in Practice*. Transportation Science, 42(4):420-435, 2008.
- [7] Nachtigall, K. *A Branch and Cut Approach for Periodic Network Programming*. Technical report, Hildesheimer Informatik-Berichte 29, 1994.
- [8] Odijk, M. *A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables*. Transportation Research Part B, 30(6):455-464, 1996.
- [9] Peeters, L.W.P. *Cyclic Railway Timetable Optimization*. PhD thesis, Erasmus University Rotterdam, 2003.
- [10] Schrijver, A., Steenbeek, A. *Spoorwegdienstregelingontwikkeling*. Technical report, CWI, Amsterdam, 1993.
- [11] Serafini, P., Ukovich, W. *A mathematical model for periodic event scheduling problems*. SIAM Journal on Discrete Mathematics, 2(4):550-581, 1989.
- [12] Zwaneveld, P., Kroon, L., Romeijn, H., Salomon, M., Dauzère-Pères, S., Van Hoesel, C., Ambergen, H. *Routing trains through railway stations: model formulation and algorithms*. Transportation Science, 30(3):181-194, 1996.



# Bijlage A

## Afkortingen

BUP	Basis Uur Patroon
CADANS	Combinatorisch Algebraïsch Dienstregeling Algoritme voor de Nederlandse Spoorwegen
CPF	Cycle Periodicity Formulation
CWI	Centrum Wiskunde & Informatica
DONS	Designer Of Network Schedules
NS	Nederlandse Spoorwegen
PESP	Periodic Event Scheduling Problem
ROSA	Rolling Stock Allocation





# Bijlage B

## Datasets

In deze appendix staat de lijst van treinseries waaruit de dataset bestaat.

### B.1 Intercity netwerk

Het intercity netwerk bestaat uit de volgende treinseries:

500	<i>Den Haag Centraal - Groningen</i>
700	<i>Schiphol - Groningen</i>
800	<i>Maastricht - Schagen</i>
1500	<i>Amsterdam Centraal - Amersfoort Schothorst</i>
1600	<i>Schiphol - Enschede</i>
1700	<i>Den Haag Centraal - Enschede</i>
1900	<i>Den Haag Centraal - Venlo</i>
2000	<i>Den Haag Centraal - Utrecht Centraal</i>
2100	<i>Amsterdam Centraal - Vlissingen</i>
2800	<i>Rotterdam Centraal - Amersfoort</i>
3000	<i>Nijmegen - Den Helder</i>
3100	<i>Schiphol - Nijmegen</i>
3500	<i>Schiphol - Eindhoven</i>
3600	<i>Roosendaal - Zwolle</i>
3700	<i>Schiphol - Lelystad Centrum</i>
3900	<i>Hoofddorp - Lelystad Centrum</i>
4500	<i>Amsterdam Centraal - Enkhuizen</i>
4900	<i>Utrecht Centraal - Almere Centrum</i>
5400	<i>Amsterdam Centraal - Zandvoort aan Zee</i>
8800	<i>Leiden Centraal - Utrecht Centraal</i>
10500	<i>Zwolle - Leeuwarden</i>
10700	<i>Zwolle - Leeuwarden</i>
20500	<i>Rotterdam Centraal - Utrecht Centraal</i>
21700	<i>Rotterdam Centraal - Utrecht Centraal</i>

## B.2 Netwerk met alle NS treinen

Het netwerk met alle NS treinen is uitgebreid met deze treinseries:

2200	<i>Amsterdam Centraal - Breda</i>
2600	<i>Den Haag Centraal - Amsterdam Centraal</i>
3300	<i>Hoofddorp - Hoorn Kersenboogerd</i>
3400	<i>Den Haag Centraal - Hoorn</i>
3800	<i>Zwolle - Emmen</i>
4000	<i>Uitgeest - Rotterdam Centraal</i>
4100	<i>Rotterdam Centraal - Hoek van Holland Strand</i>
4200	<i>Rotterdam Centraal - Maassluis West</i>
4300	<i>Hoofddorp - Lelystad Centrum</i>
4400	<i>'s-Hertogenbosch - Nijmegen</i>
4600	<i>Amsterdam Centraal - Almere Oostvaarders</i>
4800	<i>Amsterdam Centraal - Uitgeest</i>
5000	<i>Leiden Centraal - Dordrecht</i>
5100	<i>Den Haag Centraal - Roosendaal</i>
5200	<i>Tilburg Universiteit - Eindhoven</i>
5500	<i>Utrecht Centraal - Baarn</i>
5600	<i>Utrecht Centraal - Zwolle</i>
5700	<i>Utrecht Centraal - Leiden Centraal</i>
5800	<i>Amsterdam Centraal - Amersfoort Vathorst</i>
6000	<i>Utrecht Centraal - Tiel</i>
6300	<i>Den Haag Centraal - Haarlem</i>
6400	<i>Eindhoven - Weert</i>
6800	<i>Maastricht Randwyck - Roermond</i>
6900	<i>Heerlen Sittard</i>
7000	<i>Apeldoorn - Enschede</i>
7400	<i>Breukelen - Rhenen</i>
7500	<i>Ede-Wageningen - Arnhem</i>
7600	<i>Nijmegen - Zutphen</i>
7900	<i>Nijverdal - Enschede</i>
8000	<i>Zwolle - Emmen</i>
8500	<i>Zwolle - Kampen</i>
9100	<i>Zwolle - Groningen</i>
9500	<i>Alphen aan den Rijn - Gouda</i>
9600	<i>'s-Hertogenbosch - Deurne</i>
9800	<i>Den Haag Centraal - Utrecht Centraal</i>
12100	<i>Roosendaal - Vlissingen</i>
13600	<i>Breda - 's-Hertogenbosch</i>
14700	<i>Uitgeest - Amsterdam Centraal</i>
16000	<i>Utrecht Centraal - 's-Hertogenbosch</i>
17400	<i>Breukelen - Utrecht Centraal</i>
17800	<i>Zutphen - Apeldoorn</i>
17900	<i>Zwolle - Nijverdal West</i>
19800	<i>Den Haag Centraal - Gouda Goverwelle</i>