



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Opleiding Informatica

Het construeren en evalueren
van dienstregelingen

Robin Smit

Supervisors:
Rudy van Vliet en Walter Kusters

BACHELOR THESIS

Leiden Institute of Advanced Computer Science (LIACS)
www.liacs.leidenuniv.nl

12 augustus 2026

Samenvatting

We onderzoeken in hoeverre het mogelijk is om dienstregelingen voor een gegeven spoor-netwerk met een computerprogramma te genereren en te evalueren. Vanwege de complexiteit van het onderwerp beperken we de scope van het onderzoek en leggen we ons nadrukkelijk toe op het construeren van zogeheten „symmetrische dienstregelingen” voor een spoornetwerk, zoals ingevoerd in het programma. We evalueren de gegenereerde dienstregelingen aan de hand van een verzameling fictieve reizen, waarmee we de prestaties van elke dienstregeling bepalen. Hieropvolgend herevalueren we ook een aantal dienstregelingen met een verzameling reizen waarvoor ze niet in de eerdere evaluatie geselecteerd zijn. Hieruit zal blijken dat bepaalde selecties dienstregelingen beter bestand zijn tegen afwijkende reispatronen dan andere dienstregelingen, ook al presteerden deze beter bij de eerste evaluatie.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Inspiratie	1
1.2	Probleemstelling	2
1.3	Doelen	2
1.3.1	Construeren van dienstregelingen	2
1.3.2	Evalueren van dienstregelingen	2
1.4	De opzet van dit onderzoek	3
2	Definities	4
2.1	Treinen	4
2.1.1	Series	4
2.1.2	Ritten	4
2.1.3	Reispatronen	4
2.2	Opbouw spoornetwerk	4
2.2.1	Stations	4
2.2.2	Baanvakken	6
2.2.3	Aansluitingen	6
2.3	Representatie spoornetwerk	7
2.3.1	Trajecten	7
2.3.2	Knooppunten	7
2.4	Dienstregeling	8
2.4.1	Wat betekent „conflictvrij”?	9
2.4.2	Paden	9
2.4.3	Cadansen	9
2.4.4	Trajectcadansen	9
2.4.5	Knooppuntsegmentcadansen	10
2.4.6	Partiële dienstregelingen	10
3	Keuzes en beperkingen	12
3.1	Infrastructurele vereenvoudigingen	12
3.1.1	Sporen	12
3.1.2	Wissels	12
3.1.3	Knooppunten	12
3.1.4	Netwerkgrootte	13
3.2	Dienstregelingmatige vereenvoudigingen	14
3.2.1	Reistijden	14
3.2.2	Symmetrie	14
3.3	Vereenvoudigingen in evaluatie	18
4	Het construeren van dienstregelingen	19
4.1	Opbouwen van reispatronen	19
4.2	Opbouwen van trajectcadansen	19
4.3	Opbouwen van knooppuntsegmentcadansen	20

4.4	Opbouwen van partiële dienstregelingen	20
4.5	Opbouwen van volledige dienstregelingen	20
5	Het evalueren van dienstregelingen	22
5.1	Hoe ziet de evaluatie eruit	22
5.2	Het vinden van de beste reisoctie	22
5.3	Evaluatie van partiële dienstregelingen	24
5.4	Evaluatie van dienstregelingen	26
5.5	Wat wordt er gemeten?	26
6	Resultaten	28
6.1	De beste dienstregelingen	28
6.2	De beste slechtste dienstregelingen	28
6.3	De slechtste dienstregelingen	28
6.4	De beste random dienstregelingen	29
6.5	De random dienstregelingen	29
6.6	Observaties	30
6.7	Dienstregelingen met afwijkende reispakketten	31
6.8	De effectiviteit van meer partiële dienstregelingen bewaren	33
6.9	Metadata	35
7	Conclusie	42
	Referenties	45

1 Inleiding

De trein is tegenwoordig één van de vele opties om mensen en goederen te verplaatsen. Elke vorm van transport heeft zijn eigen voor- en nadelen. Voordelen van treinen zijn bijvoorbeeld de hoge energetische efficiëntie en de lage ruimtelijke voetafdruk van de infrastructuur. Nadelen van treinen zijn echter de hoge kosten voor het aanleggen van de infrastructuur, het statische karakter van de infrastructuur, en de grote gevolgen als er fouten gemaakt worden bij het gebruik van de infrastructuur.

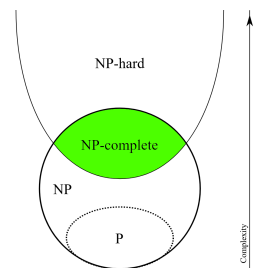
Het effectief benutten van bestaande infrastructuur is een belangrijk onderdeel van de rendabiliteit van een spoornetwerk. Om de rendabiliteit te verbeteren, is het belangrijk om te weten hoe de infrastructuur gebruikt wordt, en hoe het gebruik kan worden geoptimaliseerd.

1.1 Inspiratie

Het oorspronkelijke idee voor dit onderzoek is ontstaan door Open Transport Tycoon Deluxe (een hedendaagse variant van het klassieke Transport Tycoon). Dit is een tycoon spel waarin een speler de eigenaar van een transportbedrijf is. Hierin is het ook mogelijk om een spoornetwerk te bouwen. Hoewel het spel een versimpelde weergave van de praktijk is, biedt het een accurate representatie van hoe een spoornetwerk op grote schaal werkt, door middel van individueel aan te leggen sporen, seinen, wissels, wisselstraten en stations. Ook is het mogelijk om treinen volgens een dienstregeling te laten rijden. Omdat het spoornetwerk in het spel erg complex was geworden, nam de hoeveelheid werk die nodig was om een dienstregeling te maken enorm toe. Hieruit ontstond de vraag of het mogelijk was om dienstregelingen automatisch te genereren en de beste te selecteren.

Gerelateerd werk

Het opstellen van dienstregelingen is een variant van Periodic Event Scheduling problemen. Hiervan is bekend dat ze NP-volledig zijn, maar in de praktijk door fysieke beperkingen vaak NP-moeilijk blijken [Serafini, Ukovich]. In [Serafini, Ukovich] wordt ook een methode voorgesteld in de vorm van een mixed integer programming aanpak [Serafini, Ukovich]. Hier is gebruik van gemaakt om aankomst- en vertrektijden met elkaar te koppelen in het bepalen van dienstregelingen [Odijk et al.]. Een andere aanpak voor dit probleem is een Cycle-Basis formulering. Waar bij de mixed integer programming aanpak de daadwerkelijke dienstregeling geconstrueerd wordt, wordt bij de Cycle-Basis variant de onderlinge verhouding tussen (in dit geval) de treinen bepaald. Hieruit kan de dienstregeling vervolgens berekend worden. Over deze aanpak is onder andere geschreven in [Liebchen, Peeters] en [Caimi et al.].



Recente ontwikkelingen zijn het bepalen van extra voorwaarden om robuustere dienstregelingen te maken [Solinen, Palmqvist], en het bepalen en afwegen van efficiëntie tegenover de aanpasbaarheid van een dienstregeling [Polinder et al.]. Deze onderzoeken zijn allemaal (gedeeltelijk) gefundeerd op de eerder genoemde mixed integer programming aanpak. Als laatste blijken de Periodic Event Scheduling problemen ook om te schrijven naar satisfiability problemen, zodat deze met SAT-solvers

aangepakt kunnen worden. Hierdoor wordt het mogelijk om grotere problemen op te lossen, al dan niet in dezelfde tijd die kleinere problemen aanvankelijk kostten [Großmann et al.].

Omdat het voor ons niet mogelijk is om dienstregelingen aan de praktijk te toetsen, vallen optimalisaties met betrekking tot de praktijk al snel buiten de scope van dit onderzoek. Andere verbeteringen, zoals het bepalen van de bestendigheid van een dienstregeling tegen onvoorziene omstandigheden, zijn vanwege de complexiteit ook buiten scope. We richten ons in dit onderzoek op het conflictvrij laten rijden van treinen, met het in acht nemen van de beschikbare infrastructuur.

1.2 Probleemstelling

Om zo goed mogelijk gebruik te kunnen maken van de beschikbare infrastructuur van een spoor-netwerk, is het nodig om een zo goed mogelijk inzicht te creëren in hoe de infrastructuur over tijd gebruikt wordt. Dit kan aan de hand van een dienstregeling. Een dienstregeling beschrijft waar elke trein in het spoornetwerk zich op een gegeven moment bevindt. Wanneer de wachttijden op stations en de reistijden tussen stations van elke trein bekend zijn, kan worden afgeleid wanneer welke trein zich waar bevindt. Met deze informatie bekend, kan een dienstregeling worden opgesteld. Maar is het mogelijk om een dienstregeling met een computerprogramma te construeren? En hoe kan een dienstregeling vergeleken worden met andere dienstregelingen?

1.3 Doelen

Er zijn twee doelen van dit onderzoek: het construeren van dienstregelingen en het evalueren van dienstregelingen.

1.3.1 Construeren van dienstregelingen

Is het mogelijk om met een computerprogramma een dienstregeling te construeren? Hoe kan de oplossingsruimte zoveel mogelijk beperkt worden om werk te besparen?

De eigenschappen van een goede dienstregeling voor reizigerstreinen zijn anders dan voor goederentreinen. Voor goederentreinen is de capaciteit van een dienstregeling belangrijk. Voor reizigerstreinen zijn aspecten zoals reistijd en frequentie belangrijk. De focus van dit onderzoek ligt bij dienstregelingen voor reizigerstreinen. Hierbij zal niet alleen gekeken worden naar hoe een oplossing gevonden kan worden voor de capaciteitsbehoefte¹ voor het spoornetwerk, maar ook naar hoe geschikt een oplossing is.

1.3.2 Evalueren van dienstregelingen

Wat is een goede dienstregeling? Hoe kan een dienstregeling geëvalueerd worden? Wat zijn interessante/relevante aspecten/eigenschappen van een dienstregeling?

Voor dit onderzoek zullen dienstregelingen beoordeeld worden op basis van een aantal eigenschappen, zoals gemiddelde reistijd, aantal overstaps, en wachttijden op stations.

¹Dat wil zeggen: hoe vaak moeten welke treinen waar rijden?

1.4 De opzet van dit onderzoek

Dit is een bachelorscriptie voor de opleiding Informatica aan de Universiteit Leiden, begeleid door Rudy van Vliet en Walter Kusters. De scriptie is als volgt georganiseerd:

Hoofdstuk 2 bevat een lijst van definities om de lezer bekend te maken met de concepten die we behandelen. In Hoofdstuk 3 behandelen we wat precies wel en niet aan bod komt in dit onderzoek. Hoofdstuk 4 bestaat uit een beschrijving van de stappen die het programma neemt om dienstregelingen te construeren. In Hoofdstuk 5 geven we uitleg over de evaluatie van de dienstregelingen, waarna in Hoofdstuk 6 de resultaten besproken worden. In Hoofdstuk 7 bespreken we de conclusie, en komen we terug op een aantal open eindjes.

Dankwoord

Ik bedank Rudy van Vliet voor zijn geduld.

Ook wil ik graag [Wim Kusee](#) bedanken voor het ter beschikking stellen van zijn TijdWeg programma, dat ik gebruikt heb om, de „tijd-weg”-diagrammen te genereren.

2 Definities

Hier volgt een lijst van definities voor terugkerende begrippen uit dit onderzoek. Om deze begrippen te verduidelijken, zal er gerefereerd worden naar het „tijd-weg”-diagram in Figuur 1.

2.1 Treinen

Een dienstregeling bestaat uit treinen, die op gegeven momenten op bepaalde plekken zijn. Er wordt echter niet geprobeerd om elke trein individueel te plannen. Treinen worden ingepland aan de hand van series en hun ritten.

2.1.1 Series

Een serie is een template voor een verzameling treinen die allemaal dezelfde eigenschappen delen, zoals de route die een trein rijdt in het spoornetwerk, en waar een trein onderweg stopt. De treinserie beschrijft ook hoe vaak er een trein rijdt die volgens die serie rijdt. In Figuur 1 is één serie opgenomen. Deze rijdt elk half uur tussen Roosendaal en Vlissingen, en stopt op de tussengelegen stations.

2.1.2 Ritten

Waar een serie gezien kan worden als een type trein, is een rit een instantie van een type trein. Van een rit is bekend wanneer en waar deze rijdt. In Figuur 1 is dit te zien als de uitvoering van één van de lijnen uit het diagram. Een rit is een instantie van een reispatroon, met een absolute starttijd.

2.1.3 Reispatronen

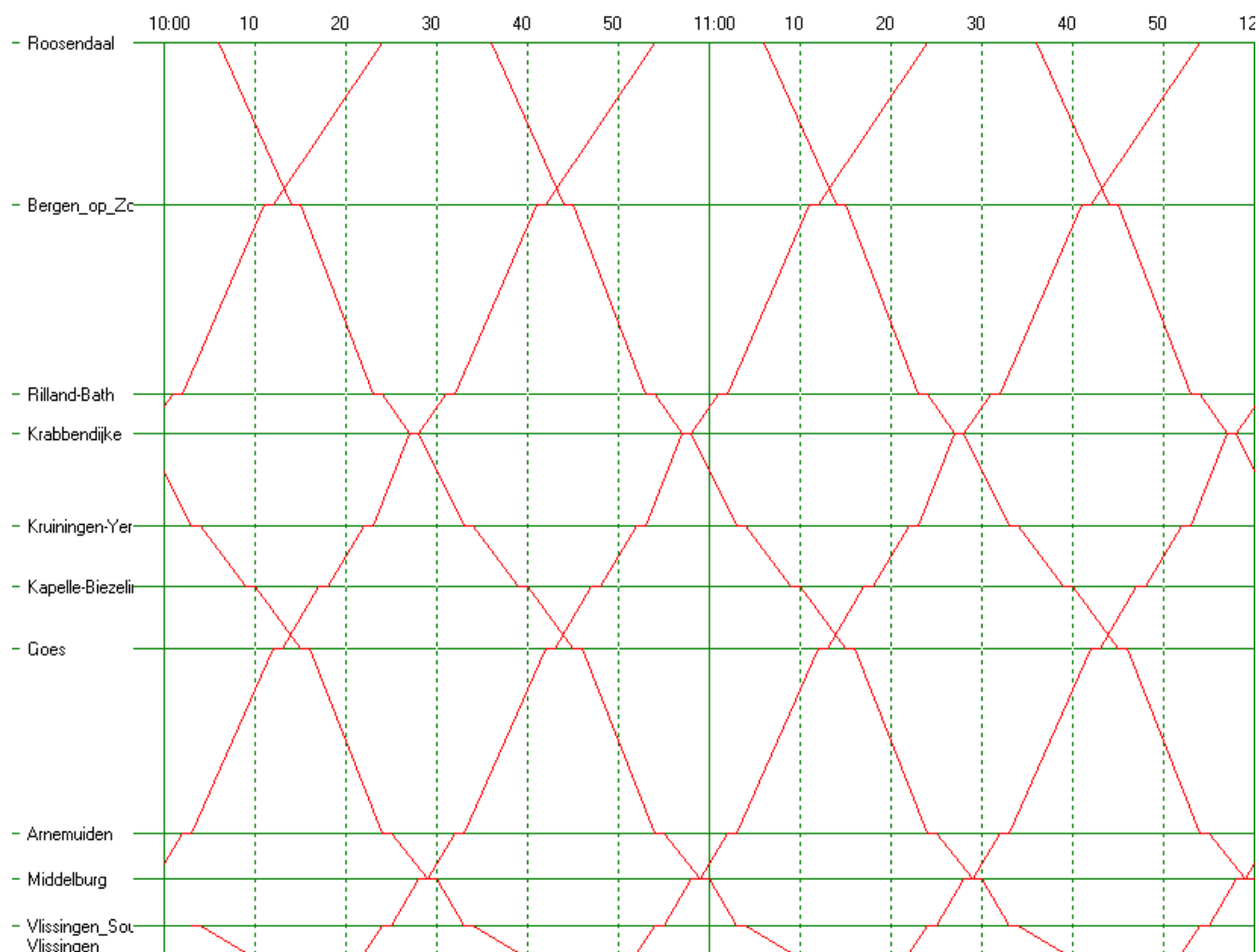
Een reispatroon is een beschrijving van de manier waarop een rit zich door een traject beweegt. Elke serie die over een traject rijdt kan bij verschillende stations stoppen, en dit leidt tot een ander reispatroon door een traject. Reispatronen bestaan uit een verzameling op elkaar aansluitende paden waarop een trein op een locatie van een traject binnenkomt en vertrekt. In een „tijd-weg”-diagram is een reispatroon de beschrijving van één lijn in het diagram. Elk stukje uit zo’n lijn is een pad; een beschrijving hoe een trein tussen twee punten in het netwerk beweegt. In Figuur 1 is te zien hoe elke rit van de serie in dezelfde richting hetzelfde reispatroon vertoont, verschoven in de tijd.

2.2 Opbouw spoornetwerk

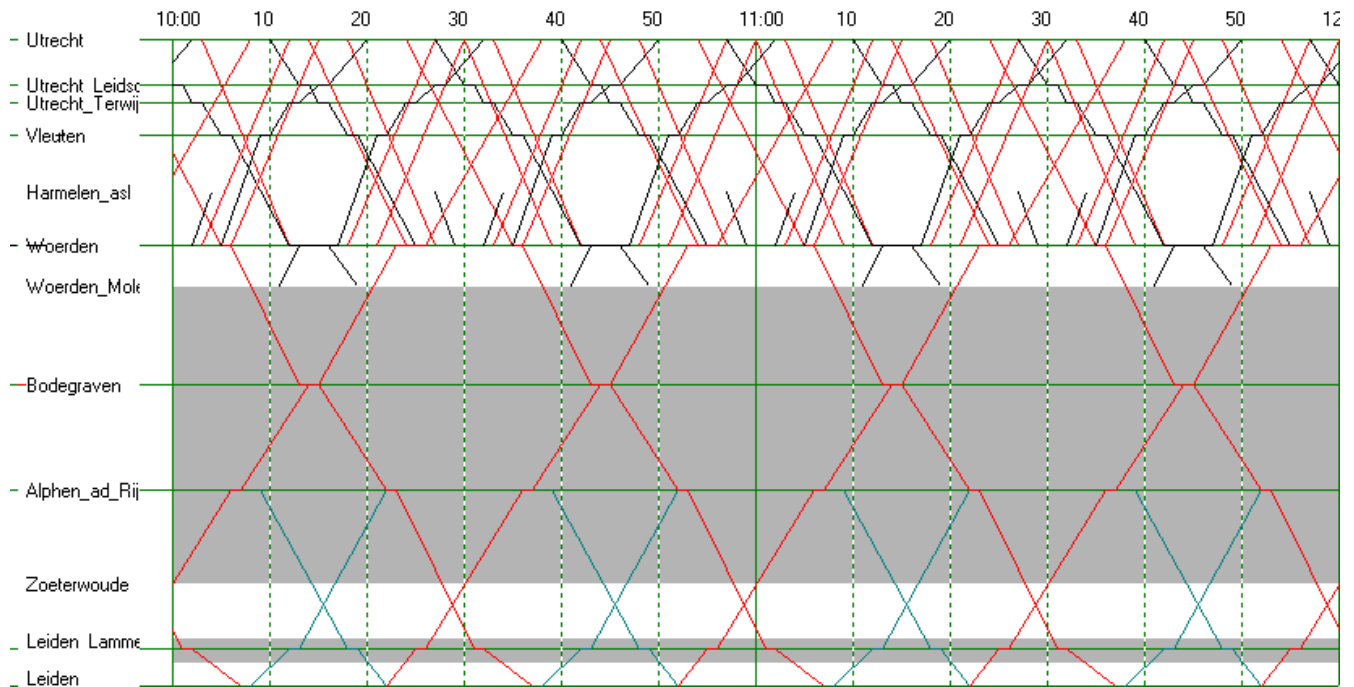
Een spoornetwerk kan op verschillende niveaus als een graaf beschouwd worden. Voor dit onderzoek wordt het netwerk op een macro-schaal bekeken. Er wordt niet gekeken naar hoe sporen en wissels exact liggen, maar naar hoe het netwerk op een hoger niveau opgebouwd is. Op dit hogere niveau worden de knooppunten van de graaf locaties genoemd. Deze worden voor dit onderzoek in drie categorieën onderverdeeld.

2.2.1 Stations

Stations zijn locaties waar treinen kunnen stoppen, en grenzen aan minimaal één andere locatie. Treinen zijn niet verplicht om te stoppen bij een station; Dit wordt bepaald door de eigenschappen



Figuur 1: Een „tijd-weg”-diagram van het traject Roosendaal - Vlissingen. Gegenereerd met het programma van Wim Kusee, uit een aangeleverd voorbeeldbestand met dienstregelingdata.



Figuur 2: Een „tijd-weg”-diagram van het traject Utrecht - Leiden. Gegeneerd met het programma van Wim Kusee, uit een aangeleverd voorbeeldbestand met dienstregelingdata.

van de serie van een trein. De wachttijd van treinen op stations kan variëren, maar zal voor dit onderzoek altijd twee minuten zijn; dit wordt verder toegelicht in Paragraaf 3.2.

2.2.2 Baanvakken

Baanvakken zijn locaties waar treinen niet kunnen stoppen, en grenzen altijd aan twee andere locaties. Meestal zijn dit stations en/of aansluitingen. Ze hebben een lengte, en het kost treinen tijd om deze lengte af te leggen. Dit is de reistijd van een trein over een baanvak.

2.2.3 Aansluitingen

Aansluitingen zijn locaties waar treinen niet kunnen stoppen, en die grenzen aan meer dan twee andere locaties. Ze vormen hiermee knooppunten die geen stations zijn. Treinen hebben doorgaans geen reistijd over een aansluiting; het zijn niet meer dan punten in het netwerk waar meerdere andere locaties bij elkaar komen.

Mocht er echter een station aan een aansluiting grenzen waar een trein ook stopt, dan zal die trein tóch een reistijd hebben in de aansluiting, omdat er rekening gehouden wordt met het rijgedrag van de trein, en er dus versneld of vertraagd moet worden om de stop in te kunnen passen in het reispatroon.

Op het traject van Figuur 1 zijn geen aansluitingen zichtbaar. In Figuur 2 is wél een aansluiting zichtbaar: Harmelen aansluiting (genoteerd als „Harmelen_asl”).

2.3 Representatie spoornetwerk

Een spoornetwerk kan bij uitstek gerepresenteerd worden in de vorm van een graaf. Dit is mogelijk op verschillende detailniveau's, maar op grote schaal kunnen stations als knopen worden beschouwd, en de verbindingen tussen stations als de takken van de graaf. Op een nog iets grotere schaal kan er gesproken worden over knooppunten, en de verbindingen daartussen, trajecten.

2.3.1 Trajecten

Trajecten zijn reeksen opeenvolgende baanvakken en stations, en verbinden stations en/of aansluitingen met elkaar. Op stations binnen een traject kan er tussen treinen worden overgestapt, maar dit levert de reiziger waarschijnlijk geen tijdswinst op. Stations die in een traject worden opgenomen, hebben altijd twee aangrenzende locaties. Als een trein op een station stopt dat binnen een traject ligt, dan zal voor de reistijdberekeningen worden aangenomen dat de wachttijd bij zulke stations altijd één minuut is. Dit verschilt van de wachttijd van twee minuten voor andere stations. Op stations waar overgestapt kan worden, wordt de hiervoor genoemde twee minuten wachttijd aangehouden. Voor een voorbeeld van een traject, zie Tabel 1.

Voor trajecten kan als geheel een cadans, een soort mini-dienstregeling voor alleen dat traject, berekend worden, en voor aansluitingen en stations met meer dan twee aangrenzende locaties worden cadansen individueel berekend. Over cadansen volgt later meer.

Traject Rotterdam Centraal - Den Haag HS			
	Van	-	Naar
Baanvak	Rotterdam Centraal	-	Schiedam Centrum
Station	Schiedam Centrum		
Baanvak	Schiedam Centrum	-	Delft Campus
Station	Delft Campus		
Baanvak	Delft Campus	-	Delft
Station	Delft		
Baanvak	Delft	-	Rijswijk
Station	Rijswijk		
Baanvak	Rijswijk	-	Den Haag Moerwijk
Station	Den Haag Moerwijk		
Baanvak	Den Haag Moerwijk	-	Den Haag HS

Tabel 1: Een voorbeeld van een traject (Rotterdam Centraal - Den Haag HS). Merk op dat de knooppunten, Rotterdam Centraal en Den Haag HS, geen onderdeel zijn van het traject.

2.3.2 Knooppunten

Aansluitingen en stations met minder óf meer dan twee aangrenzende locaties vormen op macroschaal de knooppunten van het spoornetwerk. Trajecten vormen de verbindingen tussen deze knooppunten. Als een knooppunt maar één aangrenzende locatie heeft, is het dus een station

(en wat het model betreft, een kopstation), en is de cadans voor dit knooppunt triviaal: bij zo'n knooppunt kunnen ritten alleen maar beginnen of eindigen, en er wordt in dit onderzoek geen rekening gehouden met wisselstraten of spoorcapaciteit. Op zulke knooppunten kunnen treinen op alle tijdstippen vertrekken en aankomen. Hierover later meer. Wanneer een knooppunt meer dan twee aangrenzende locaties heeft, kunnen treinen uit verschillende richtingen aankomen, en weer in verschillende richtingen vertrekken. Voor dit soort knooppunten moeten apart cadansen berekend worden, omdat de cadansen van aangrenzende trajecten op elkaar moeten passen; ook hierover later meer.

Knooppuntsegmenten

Een knooppuntsegment representeert een deel van een knooppunt. Wanneer er gekeken wordt naar welke treinseries met elkaar overlappen, en mogelijk in conflict kunnen zijn, ontstaan er verzamelingen van series die binnen een verzameling wel met elkaar overlappen, maar geen overlap met elkaar hebben. Dit is het gevolg van een beperking die beschreven zal worden in Paragraaf 3.1. Een knooppunt kan dus uiteen vallen in kleinere onderdelen die nooit in conflict zijn met elkaar. Verderop in dit onderzoek zal er dus niet alleen over knooppunten gesproken worden, maar vooral over knooppuntsegmenten.

Een voorbeeld: station Leiden Centraal bestaat, wat ons betreft, uit twee knooppuntsegmenten. Treinen vanuit Den Haag rijden door richting Haarlem en Schiphol, terwijl treinen vanuit Utrecht eindigen (en keren) in station Leiden Centraal. Treinen van en naar Utrecht zijn nooit in conflict met de andere treinen. Hierdoor kan station Leiden Centraal opgesplitst worden in twee knooppuntsegmenten, waarvoor apart oplossingen geconstrueerd kunnen worden.

Welke trajecten aan welk knooppuntsegment grenzen wordt bepaald door uit te zoeken welke treinseries over welke trajecten rijden, en de trajecten zo onder te verdelen in van elkaar onafhankelijke verzamelingen. Er kunnen immers trajecten zijn die geen series met elkaar delen. Als er ook geen derde traject is dat series van beide trajecten bevat, dan staan de twee trajecten volledig los van elkaar. Het zou niet zinnig zijn om te controleren welke combinaties geldig zijn; omdat er geen overlap is, zijn *alle* combinaties geldig. Hierom is ervoor gekozen om knooppunten, waar mogelijk, op te splitsen in meerdere stukken, die onderling geen overlap of interactie met elkaar hebben. Elk van deze verzamelingen vormt een knooppuntsegment waarvoor een cadans berekend kan worden.

2.4 Dienstregeling

De definitie van een dienstregeling is dat, gegeven een spoornetwerk en een verzameling treinseries, alle ritten van alle series gereden worden, en er geen ritten zijn die onderling conflicten met elkaar hebben. Er is sprake van een dienstregeling wanneer voor elke rit van elke serie bekend is waar deze zich bevindt op een bepaald tijdstip.

Binnen dit onderzoek zal er stapsgewijs naar dienstregelingen toegewerkt worden. Dit wordt gestructureerd aangepakt, aan de hand van de volgende concepten.

2.4.1 Wat betekent „conflictvrij”?

Conflictvrij betekent dat de verschillende paden van treinen niet met elkaar overlappen, en twee treinen niet op hetzelfde moment op dezelfde plek zijn, met uitzondering van stations. Voor dit onderzoek zal er alleen van een cadans gesproken worden wanneer er ook daadwerkelijk voldaan is aan de conflictvrij-eis. Om de complexiteit van het testen op conflicten te verkleinen, zullen treinen in tegengestelde richting nooit in conflict zijn. Dit betekent dat er in dit onderzoek voor beide rijrichtingen altijd één spoor beschikbaar is. Treinen kunnen elkaar ook niet inhalen op een traject.

2.4.2 Paden

Een pad representeert een tijdsreservering voor een trein op een bepaalde locatie. Een pad bestaat uit een begin- en eindtijd, voor welke locatie de reservering geldt, voor welke serie deze reservering geldig is, vanuit welke aangrenzende locatie de trein aankomt, en naar welke aangrenzende locatie de trein toe vertrekt. Zoals eerder besproken zijn reispatronen verzamelingen van op elkaar aansluitende paden. Een reispatroon is dus een pad voor een traject als geheel.

Merk op dat paden op zichzelf niets zeggen over wanneer een trein zich ergens bevindt. Zolang een pad of een reispatroon niet in een cadans zit, is het niets meer dan een suggestie voor wanneer een trein ergens zou kunnen rijden. In Figuur 1 is een pad een segment van één van de ritten. Dit kan een horizontaal segment zijn bij een station, of een segment tussen twee stations (een pad voor een baanvak).

2.4.3 Cadansen

Een cadans is een verzameling van reispatronen voor alle ritten die op een traject of een knooppunt-segment zullen rijden, en representeert een geldige oplossing om alle treinen conflictvrij te laten rijden. Elk van de reispatronen correspondeert met één enkele rit. Voor elke rit is er een reispatroon. Er zijn verschillende soorten cadansen:

2.4.4 Trajectcadansen

Een trajectcadans is een cadans voor een traject, en bestaat uit een verzameling reispatronen, één voor elke rit die over het traject rijdt, in combinatie met één Δt voor elk reispatroon. De Δt stelt een verschuiving van een reispatroon in de tijd voor. Samen vormen de reispatronen en hun Δt 's één trajectcadans.

Het kan lijken alsof het gebruik van een Δt voor een trajectcadans overbodig is. Dit zou immers al verwerkt kunnen worden in de reispatronen. De reden dat de Δt later toegepast wordt, heeft ermee te maken dat bij het inplannen van de verschillende treinen een template reispatroon wordt gebruikt, dat op $t = 0$ begint. Het reispatroon ziet er namelijk voor elke mogelijke starttijd hetzelfde uit.

Er zijn meestal meerdere geldige verzamelingen reispatronen met tijdsdelta's mogelijk. Elk van deze verzamelingen is een configuratie waarin de reispatronen geen onderlinge conflicten hebben.

Figuur 1 kan als geheel gezien worden als een mogelijke trajectcadans voor het afgebeelde traject.

2.4.5 Knooppuntsegmentcadansen

Een knooppuntsegmentcadans is een cadans voor een station of aansluiting, en omvat één knooppuntsegment, en de daaraan grenzende trajecten.

Een knooppuntsegmentcadans bestaat uit een verzameling paden, één voor elke rit die langs het knooppuntsegment komt (met uitzondering van kopstations), die het wachten bij een station, of het doorrijden op een aansluiting op het knooppunt representeren. Samen met één trajectcadans voor elk aangrenzend traject van dat knooppuntsegment wordt er een knooppuntsegmentcadans gevormd. Deze paden worden gebruikt om de cadansen van de aangrenzende trajecten op elkaar aan te sluiten. Alle ritten van een serie moeten dan nog wel dezelfde wachttijd hebben bij een station.

Knooppuntsegmentcadansen zijn dus een configuratie van wachttijden, gerepresenteerd door paden voor dat knooppuntsegment, in combinatie met één trajectcadans van elk aangrenzend traject met een bepaalde Δt , waarvoor geldt dat alle paden van alle ritten door het knooppunt heen op elkaar aansluiten.

In Figuur 1 is geen knooppuntsegmentcadans te zien. Een knooppuntsegmentcadans heeft betrekking op een knooppunt, en zou bijvoorbeeld geconstrueerd kunnen worden voor station Roosendaal.

	Traject 1		Knooppunt		Traject 2		Traject 3	
Series	In	Uit	Aankomst	Vertrek	In	Uit	In	Uit
Serie 1 heen	11	17	17	19	19	26		
Serie 2 heen	23	26	26	28			28	36
Serie 1 terug	43	49	41	43	34	41		
Serie 2 terug	34	37	32	34			24	32

Tabel 2: Een voorbeeld van een knooppuntsegmentcadans. Om het voorbeeld begrijpelijker te houden is de tijdsdelta weggelaten.

In Tabel 2 maken twee ritten van series 1 en 2 allebei gebruik van traject 1, stoppen op het knooppunt, en vervolgen hierna hun weg in verschillende richtingen. De series in de heenrichting lezen van links naar rechts. Hoewel de wachttijden in het knooppunt er hetzelfde uitzien, moet begrepen worden dat de rijtijden in de trajecten voor de treinen in de terugrichting de andere kant op gelezen moeten worden. Treinen in de terugrichting komen het traject binnen aan de andere kant van het traject, en reizen in tegengestelde richting van de treinen in de heenrichting.

2.4.6 Partiële dienstregelingen

Een partiële dienstregeling is op zichzelf een dienstregeling voor een kleiner deel van het spoornetwerk, dat onafhankelijk is van de rest van het netwerk. Dit heet een subnetwerk. Alle series die in de partiële dienstregeling zitten, zitten niet in een andere partiële dienstregeling. Een dienstregeling voor het gehele netwerk kan worden opgebouwd door een combinatie van één partiële dienstregeling voor elk subnetwerk. Een partiële dienstregeling bestaat uit op elkaar passende knooppuntsegmentcadansen, één voor elk knooppuntsegment van het subnetwerk. Knooppuntsegmentcadansen passen

op elkaar wanneer zij voor een traject dat ze delen dezelfde trajectcadans en tijdsdelta als deel van een oplossing hebben.

Het is goed mogelijk dat een spoornetwerk op te splitsen is in subnetwerken. Neem bijvoorbeeld een station zoals Leeuwarden. Alle series die stoppen op dit station, eindigen ook op dit station. Dit betekent dat binnen het model dat gehanteerd wordt binnen dit onderzoek, elk traject een aparte knooppuntsegmentcadans heeft voor Leeuwarden. Wanneer de treinen richting Stavoren rijden is niet van invloed op de treinen richting Meppel. Zodoende is het traject Leeuwarden - Stavoren onderdeel van een ander subnetwerk dan het traject Leeuwarden - Meppel. Voor deze twee subnetwerken zijn dus twee losstaande dienstregelingen te construeren, die in elke combinatie tot een conflictvrij geheel zullen leiden.

3 Keuzes en beperkingen

Zoals eerder gesteld groeit de complexiteit van het construeren van dienstregelingen exponentieel. In een poging de complexiteit het hoofd te kunnen bieden is een aantal vereenvoudigingen toegepast. Deze vallen in drie categorieën: Het beperken van de mogelijk infrastructuur in het probleem, het beperken van de te vinden dienstregelingen, en het beperken van de evaluatie van oplossingen.

3.1 Infrastructurele vereenvoudigingen

De eerste categorie gaat over het vereenvoudigen van de infrastructuur.

3.1.1 Sporen

In de realiteit liggen er verschillende aantallen sporen tussen stations. Vaak is dit een tweetal, om treinen in verschillende richtingen van elkaar gescheiden te kunnen houden. Wanneer er meerdere sporen per richting zijn, vergroot dit de oplossingsruimte enorm. Het aantal mogelijke manieren om een set treinen te verdelen over een aantal sporen is $n_{sporen}^{n_{treinen}}$, waarbij n_{sporen} het aantal sporen per rijrichting representeert.

Omdat de oplossingsruimte zo snel kan groeien is voor dit onderzoek besloten om dit aspect niet mee te nemen in het model. Er zal gewerkt worden met één spoor per rijrichting.

3.1.2 Wissels

Wissels zijn een belangrijk aspect van spoornetwerken, en creëren meer mogelijkheden om de beschikbare infrastructuur te kunnen benutten. Hoewel ze onmisbaar zijn wanneer er afgeweken wordt van de dienstregeling, is elk wissel van grote invloed op de oplossingsruimte. Omdat elk wissel de keuze geeft om het wissel wel of niet te nemen, verdubbelt elk wissel potentieel de oplossingsruimte.

Om de zoekruimte voor dienstregelingen te beperken, worden wissels buiten beschouwing gelaten bij het construeren van dienstregelingen. Binnen trajecten zullen er geen wissels zijn. Aansluitingen zullen ook geen wissels hebben, en treinen die een aansluiting passeren zullen dit altijd conflictvrij kunnen doen, omdat dit onderzoek niet ingaat op de precieze manier waarop een trein zich door een aansluiting heen beweegt. De afwezigheid van wissels betekent ook dat stations geen wisselstraten hebben. Het effectief gebruiken van wisselstraten is geen triviaal probleem en een studie op zich, zie [Zwaneveld], en wordt voor dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

3.1.3 Knooppunten

Bij knooppunten kunnen meerdere trajecten samenkomen. Aansluitingen en stations kunnen knooppunten zijn. Aansluitingen zullen altijd (conflictvrij) gepasseerd worden, maar bij stations kan er ook worden gestopt. Doorgaans zijn voor een binnenkomende trein niet alle sporen van een station bereikbaar, en als de trein verder rijdt, zijn niet alle trajecten bereikbaar vanaf het spoor waar een trein staat. Vanwege de afwezigheid van wisselstraten wordt er ook geen rekening gehouden met de bereikbaarheid van de sporen van een station. Voor dit onderzoek hebben knooppunten die stations zijn een onbeperkt aantal sporen, en alle sporen zijn altijd bereikbaar.

Knooppuntsegmenten

De keuzes van Paragraaf 3.1.2 en 3.1.3 hebben een logisch gevolg: Omdat treinen geen conflicten met elkaar kunnen hebben in knooppunten, en stations niet „vol” kunnen zijn, zijn treinenseries die niet over hetzelfde traject rijden nooit in conflict met elkaar. Deze eigenschap hebben we al gebruikt bij de definitie van een knooppuntsegment in Paragraaf 2.3.2.

3.1.4 Netwerkgrootte

Voor grotere netwerken neemt de zoekruimte exponentieel toe. Tijdens het construeren en evalueren van dienstregelingen voor het Nederlandse spoornetwerk (het spoornetwerk dat aanvankelijk gebruikt zou worden om dienstregelingen voor te construeren) werd al snel duidelijk dat de zoekruimte dusdanig groot was dat het onbegonnen werk was om daar dienstregelingen voor te construeren via deze methode. Hierom is er de keuze gemaakt om met een kleiner netwerk te werken, zie Figuur 3. In Hoofdstuk 7 zal er dieper worden ingegaan op de gevolgen van deze keuze.

Er rijden een aantal treinseries in dit netwerk, onder te verdelen in treinen die alleen op knooppunten stoppen, en treinen die ook bij stations op trajecten stoppen. Alle series rijden twee keer per uur, op een strak interval van 30 minuten.

Series die alleen bij knooppunten stoppen (te vergelijken met sneltreinen/intercity's):

- 1 : A-F-G-J-L-M
- 2 : B-C-D
- 3 : B-E-H-L
- 4 : C-E-G-I

Treinen die ook bij stations op trajecten stoppen (te vergelijken met stoptreinen/sprinters):

- 10 : A-B-C-D
- 11 : A-F-G
- 12 : G-J-L
- 13 : B-E-H
- 14 : H-L-N
- 15 : C-E-F
- 16 : E-G-I
- 17 : J-K

Om op een later moment eenvoudiger het verschil te kunnen zien tussen deze twee soorten treinen, zijn de nummers 5 tot en met 9 overgeslagen.

Het netwerk valt uiteen in een paar subnetwerken, waar de volgende treinseries rijden:

- A-B-C-D (2 en 10)
- A-F-G-J-L-M (1, 11 en 12)
- B-E-H-L-N (3, 13 en 14)
- C-E-F-G-I (4, 15 en 16)
- J-K (17)

3.2 Dienstregelingmatige vereenvoudigingen

De tweede categorie gaat over het beperken van de dienstregelingen waar naar gezocht zal worden.

3.2.1 Reistijden

Reistijden tussen twee stations kunnen ver uiteen lopen. De reistijd is bijvoorbeeld afhankelijk van de afstand tussen de twee stations, als ook de snelheid waarmee deze afstand afgelegd wordt. De snelheid kan variëren afhankelijk van de maximaal toegestane snelheid als ook het acceleratie/deceleratievermogen van een trein. Dit heeft allemaal invloed op de reistijd van een trein tussen twee locaties. In dit onderzoek wordt er geen rekening gehouden met ál deze nuances. De reistijd over een baanvak zal berekend worden op basis van de maximale snelheid die toegestaan is op het baanvak en de lengte van het baanvak. Wanneer een trein stopt bij een station voor of na het baanvak wordt de reistijd op het baanvak iets (een extra minuut om te accelereren/remmen, totale reistijd naar boven afgerond) verruimd om rekening te houden met weggrijpen en/of stoppen.

3.2.2 Symmetrie

Symmetrie is een van de eisen waar de geconstrueerde dienstregelingen aan moeten voldoen. Dit houdt in dat, gegeven een reis tussen twee locaties, de reis in beide richtingen hetzelfde verloop heeft, maar in spiegelbeeld ten opzichte van de reis in de andere richting.

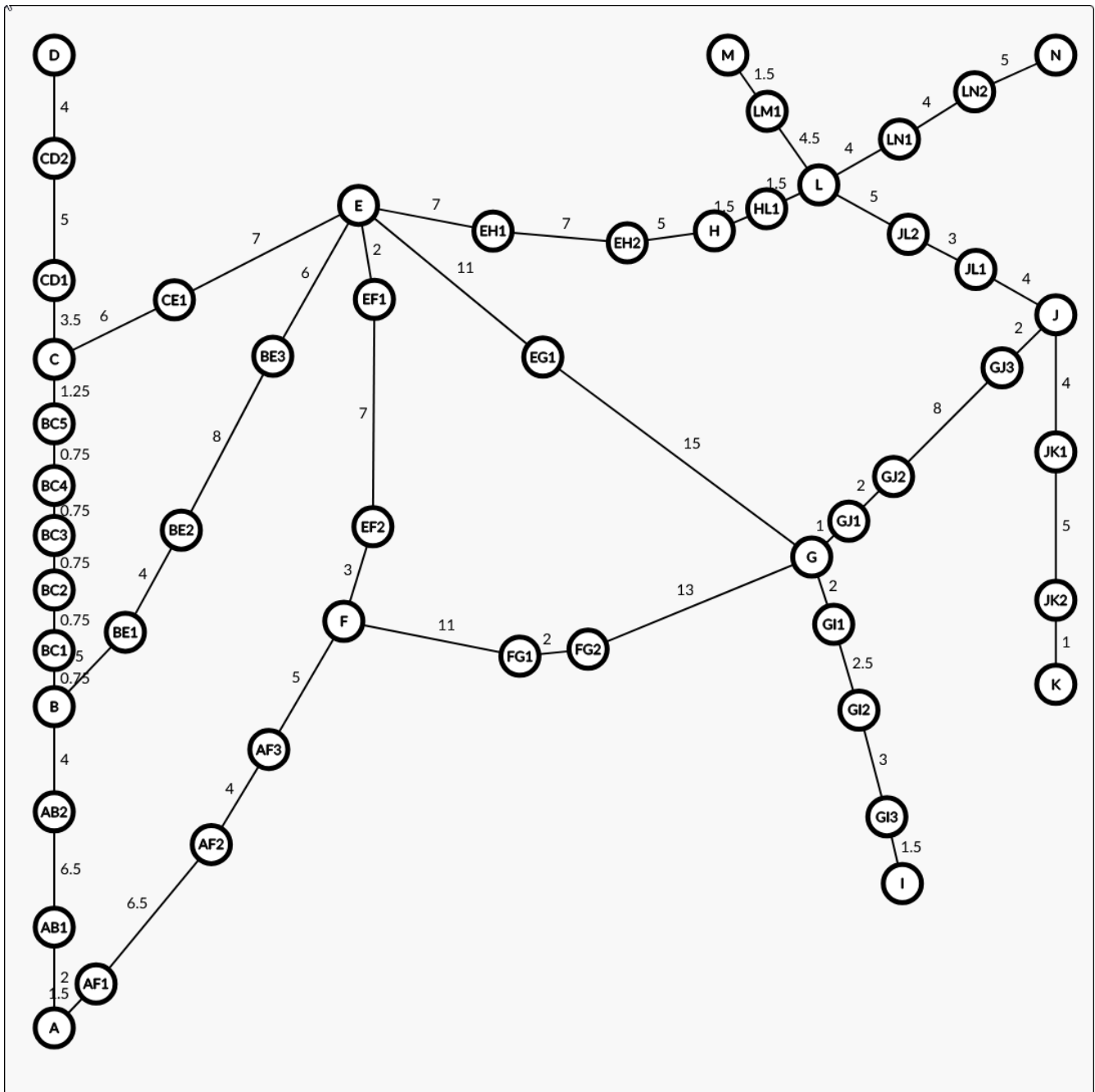
Bekijk ter illustratie het volgende voorbeeld:

Het is ochtend, en we willen van Boskoop naar Breukelen. Vanmiddag nemen we de omgekeerde reis terug. De snelste manier om de heenreis te maken² is door naar Alphen aan den Rijn te reizen, over te stappen op de trein richting Utrecht, en bij Woerden over te stappen op de trein richting Uitgeest. Zie ook Tabel 3.

Als de dienstregeling symmetrisch is, dan kan de terugreis eruit zien zoals in Tabel 4.³:

²NS Reisplanner op het moment van schrijven.

³Dit is niet exact de reis die de NS Reisplanner laat zien. Vanwege praktische factoren wijkt de reis iets af van wat de echte symmetrische reis is. De afwijkingen zijn niet van invloed voor dit voorbeeld.



Figuur 3: Het netwerk waarvoor dienstregelingen geconstrueerd zullen worden. Weergegeven zijn de stations en hun onderlinge afstanden

Reis van Boskoop naar Breukelen			
Reisdeel	Begintijd	Eindtijd	Tijdsduur
Boskoop - Alphen	10:30	10:35	5 min
Wachten in Alphen	10:35	10:39	4 min
Alphen - Woerden	10:39	10:53	14 min
Wachten in Woerden	10:53	11:03	10 min
Woerden - Breukelen	11:03	11:11	8 min
Totale reistijd	10:30	11:11	41 min

Tabel 3: De heenreis van Boskoop naar Breukelen.

Reis van Breukelen naar Boskoop			
Reisdeel	Begintijd	Eindtijd	Tijdsduur
Breukelen - Woerden	15:49	15:57	8 min
Wachten in Woerden	15:57	16:07	10 min
Woerden - Alphen	16:07	16:21	14 min
Wachten in Alphen	16:21	16:25	4 min
Alphen - Boskoop	16:25	16:30	5 min
Totale reistijd	15:49	16:30	41 min

Tabel 4: De terugreis van Breukelen naar Boskoop.

Gelijke wacht- en reistijden

Eén van de manieren om naar deze eigenschap toe te werken, is door af te dwingen dat treinen in beide richtingen voor elke locatie dezelfde wacht- of reistijd hebben. Een trein terug staat evenlang stil op een station als de trein heen, en treinen hebben dezelfde reistijd in beide richtingen van een traject. Merk op dat treinen binnen een traject stil kunnen staan bij een station. Zij staan dan één minuut stil. Op knooppunten kan de wachttijd in principe variëren, maar deze zal in beide richtingen nog steeds hetzelfde zijn.

Een bijkomend voordeel van deze eis is dat de oplossingsruimte voor geldige cadansen sterk beperkt wordt. Door te eisen dat treinen in beide richtingen evenlang op bepaalde locaties moeten zijn, en altijd één minuut stoppen bij stations waar ze moeten stoppen, volgt dat het reispatroon van een serie in de terugrichting exact omgekeerd is aan het reispatroon in de heenrichting. Dit betekent dat niet elke combinatie van reispatronen in beide richtingen geprobeerd hoeft te worden, maar dat er voor elk traject slechts één reispatroon per serie bestaat, dat omgekeerd kan worden om het reispatroon in de andere richting te bepalen.

Voor het programma geldt dat op stations die knooppunten zijn voor stoppende treinen altijd een wachttijd van twee minuten zal worden aangehouden, ook al is dit geen noodzakelijk vereiste, en kunnen de wachttijd prima gevarieerd worden om tot meer oplossingen te komen [Odijk]. Wanneer de wachttijd kan variëren worden er veel meer combinaties van trajectcadansen mogelijk die samen

een knooppuntsegmentcadans kunnen vormen. Door de wachttijd vast te zetten op twee minuten wordt de rekentijd beperkt.

Spiegeltijd

Ook als treinen vaste wachttijden hebben, kan dezelfde reis in de ene richting veel korter of langer zijn dan in de andere richting, omdat er overgestapt moet worden op een andere treinserie. We willen dienstregelingen waar de reizen in beide richtingen even lang duren. Series moeten dus ook ten opzichte van elkaar symmetrisch zijn; de overstaptijd op een station moet gelijk zijn in beide richtingen.

Dit kan gerealiseerd worden door gebruik te maken van een *spiegeltijd*. Spiegeltijd is een globaal tijdstip dat gebruikt wordt om de ritten in beide richtingen op bepaalde tijdstippen te laten vertrekken en aankomen. Als een rit in de heenrichting op een bepaald tijdstip ergens aankomt, dan moet de rit terug op een bepaald tijdstip daar vertrekken. De aankomsttijd van de heenrit ligt net zo ver van de spiegeltijd af, als de vertrektijd van de rit terug. Ritten van dezelfde serie kruisen elkaar op de spiegeltijd, of halverwege de spiegeltijd. Wanneer een rit bij het laatste station van de route binnenkomt, gebeurt dit een bepaalde tijd vóór de spiegeltijd. Na die hoeveelheid tijd ná de spiegeltijd vertrekt een rit van die serie van dat station.

Voor dit onderzoek staat de spiegeltijd vast op de hele halfuren, $t = 00/60$ en $t = 30$.

Ter illustratie: stel dat er sprake is van een treinserie die om het halfuur rijdt. Vastgesteld is dat de spiegeltijd voor deze serie 00 en 30 is. Wanneer een trein bij het laatste station aankomt, en gaat keren, zal dit gebeuren rondom de spiegeltijd. Dit houdt in, als een trein om 10:53 binnenkomt, dat deze om 11:07 weer vertrekt.

Het directe gevolg van een gelijke spiegeltijd voor alle treinseries, is dat de overstaptijden in beide richtingen op stations hetzelfde worden. Laten we ter illustratie naar de reis uit het voorbeeld kijken. Het traject tussen Alphen en Woerden bestaat uit één spoor⁴ dat door treinen in beide richtingen gebruikt wordt. Tussen Alphen en Woerden ligt het station Bodegraven. Bodegraven heeft twee perronsporen, waardoor treinen elkaar kunnen, en moeten kruisen op dit station. Omdat treinen elkaar moeten kruisen in Bodegraven, betekent dit dat het kruisen van treinen halverwege de reis, hier in Bodegraven, op of halverwege de spiegeltijd dient te gebeuren. Hierdoor vertrekt de trein uit Alphen evenveel minuten voor de spiegeltijd, als dat de trein uit Bodegraven aankomt in Alphen na de spiegeltijd. Wanneer de treinen tussen Alphen en Gouda zich ook aan dezelfde spiegeltijd houden, betekent dit dat die treinen evenveel minuten voor de spiegeltijd aankomen in Alphen, als dat ze vertrekken na de spiegeltijd. Dat betekent dat de overstaptijd tussen verschillende treinen in beide richtingen hetzelfde is, en dat de reis in beide richtingen hetzelfde is, maar gespiegeld. We zien dit inderdaad terug in het voorbeeld van de reis van Boskoop naar Breukelen en terug.

Door deze twee aspecten te waarborgen zullen de geconstrueerde dienstregelingen volledig symmetrisch zijn. Ter illustratie kan Figuur 2 nader bekeken worden. Het traject tussen Leiden en Woerden is grotendeels enkelsporig (verduidelijkt met de grijze achtergrond). Treinen kunnen elkaar enkel passeren als er meer dan één spoor ligt op een baanvak, of een station twee sporen heeft.

⁴Bij het construeren van de dienstregelingen in deze scriptie zal er echter altijd sprake zijn van twee sporen.

		$GT = TIJD + W * OVER$	
met:			
GT	=	<i>Gegeneraliseerde Reistijd voor het alternatief</i>	
$TIJD$	=	<i>Werkelijke reistijd van het alternatief</i>	
W	=	<i>Weerstand (11 minuten)</i>	
$OVER$	=	<i>Aantal overstappen in het alternatief</i>	

Figuur 4: De formule voor de gegeneraliseerde reistijd voor een route.

Wanneer de spiegeltijd verschoven wordt, zal de cadans als geheel verschoven worden. Merk ook op dat de reistijd in beide richtingen van het traject nagenoeg gelijk is.⁵

3.3 Vereenvoudigingen in evaluatie

De route van een reis

Om tussen verschillende reisoptyes de beste optie te bepalen, zal de formule voor Gegeneraliseerde Reistijd gehanteerd worden, welke ook is gebruikt voor het vergelijken van reisoptyes binnen het Nederlandse spoornetwerk, zie Figuur 4. Binnen de meeste netwerken zijn er vaak meerdere manieren om tussen twee punten te reizen. Tussen de verschillende routes bestaat een verhouding hoe vaak ze gebruikt worden. Deze verhouding kan geschat worden met een verdelingsformule, afhankelijk van de Gegeneraliseerde Reistijd van elke optie, en in hoeverre de snelste route geprefereerd wordt [Sman, p. 68].

Voor dit onderzoek zal de spreiding van reizigers over meerdere routes buiten beschouwing gelaten worden. Tijdens het evalueren van (gedeeltelijke) dienstregelingen zal altijd gekozen worden voor de „beste” reisoptye die gevonden wordt via de formule voor gegeneraliseerde reistijd. De reden hierachter is dat het niet eenvoudig is om een nauwkeurig model op te stellen van hoe reizigers zich over de verschillende reisoptyes verdelen. Bij een botte aanpak kan men zich laten inspireren door de wetten van Kirchhoff, en hoe stroom zich verdeelt in een stroomcircuit waar meerdere routes mogelijk zijn. Van der Sman laat zien dat er een sterke voorkeur gegeven moet worden aan de snelste reisoptye om de geschatte verdeling van reizigers redelijk te maken [Sman, p. 70]⁶. Effectief betekent dit dat, op een paar enkelingen na, iedere reiziger doorgaans de snelste route neemt. Hoewel er meer aspecten zijn voor wat een reisoptye aantrekkelijk kan maken voor een reiziger, zoals een warm geserveerde kop koffie, is het effect van zulke variabelen zo goed als ruis ten opzichte van de snelste reisoptye.

⁵In de praktijk wordt er nog wel eens van de exacte symmetrie en spiegeltijd afgeweken. De series van het traject Leiden - Woerden rijden namelijk door naar Utrecht, en moeten bij station Woerden tussen een groot aantal andere treinen gepast worden. Wat bijvoorbeeld te zien is, is dat de wachttijd richting Utrecht in Woerden langer is dan richting Leiden. Het doel hiervan is om eventuele vertraging op te vangen, wat weer bijdraagt aan een robuustere dienstregeling.

⁶De voorkeur voor de snelste reisoptye wordt geleidelijk lager naarmate de totale duur van de reis toeneemt. Bij langere reizen is het relatieve als tijdsverschil tussen twee reizen al snel veel lager. Een kwartier op een reis van 10 minuten is meer dan een verdubbeling, terwijl het op een reis van drie uur weinig verschil maakt: die reis duurt toch al een half dagdeel.

4 Het construeren van dienstregelingen

Het construeren van de dienstregelingen valt op te delen in een aantal stappen waar het programma doorheen gaat.

4.1 Opbouwen van reispatronen

Het opbouwen van reispatronen is relatief eenvoudig. Voor elk traject wordt per serie die over dat traject rijdt per locatie binnen het traject berekend hoelang een trein nodig heeft om door die locatie heen te bewegen. Hieruit worden paden geconstrueerd, die samen het reispatroon van een serie over een traject vormen.

Omdat er locaties van verschillende types zijn, wordt er aan elke locatie gevraagd om, gegeven de serie, te bepalen wat de reistijd (of wachttijd) van die serie is op die locatie. Aansluitingen beantwoorden deze vraag met een reistijd van 0 minuten. Stations zullen 0 minuten bij passeren of 1 minuut bij stoppen teruggeven. Baanvakken berekenen hoelang een trein nodig heeft om de lengte van het baanvak af te leggen.

Bij deze reistijden kan nog extra tijd worden opgeteld, afhankelijk van of een serie op een aangrenzend station stopt. Als dat zo is, dan wordt er voor dat station een extra minuut bij de reistijd van een baanvak of aansluiting opgeteld, om rekening te houden met weggrijpen van of stoppen voor een station. In totaal kan er maximaal twee minuten bij de reistijd van een baanvak of aansluiting worden opgeteld, als een serie bij twee stations stopt waar één locatie tussen ligt.

Een reispatroon begint altijd op $t = 0$, maar kan in tijd verschoven worden met een Δt .

4.2 Opbouwen van trajectcadansen

Het opbouwen van de trajectcadansen gebeurt iteratief over de series die over het traject rijden. De set van geldige trajectcadansen begint leeg. Per iteratie wordt voor één serie bepaald op welke Δt 's deze serie in de bestaande (gedeeltelijke) trajectcadansen past. De eerste serie wordt slechts voor een Δt ingepland, $\Delta t = 0$. Omdat de onderlinge verhouding tussen de Δt 's voor elke serie van belang is, en niet perse de waarden van de Δt 's, kan de zoekruimte hiermee aanzienlijk verkleind worden. De als eerst ingeplande serie van een traject heeft dus altijd $\Delta t = 0$. De set van Δt 's kan later met een Δt voor de gehele trajectcadans verschoven worden, om tot andere oplossingen te komen.

Na het inplannen van de eerste serie van het traject is er één (gedeeltelijke) trajectcadans. Voor de tweede serie wordt bepaald welke Δt 's voor deze serie geldig zijn, gegeven de (gedeeltelijke) cadans. Elke geldige combinatie van Δt 's geldt als een nieuwe (gedeeltelijke) trajectcadans. Nadat alle Δt 's gecontroleerd zijn, wordt de oude set trajectcadansen vervangen door de nieuwe set trajectcadansen, die gedeeltelijke oplossingen bevat waarin beide series opgenomen zijn. Voor een volgende serie worden alle Δt 's gecontroleerd voor elke bestaande trajectcadans, wat weer een nieuwe set geldige trajectcadansen oplevert, enzovoort.

4.3 Opbouwen van knooppuntsegmentcadansen

Het opbouwen van de knooppuntsegmentcadansen volgt een vergelijkbaar principe als het opbouwen van trajectcadansen. Eén voor één wordt voor elk traject een trajectcadans met de bijbehorende tijdsdelta toegevoegd aan de knooppuntsegmentcadansen. Wanneer een trajectcadans van een ander traject wordt toegevoegd, wordt gekeken voor welke tijdsdelta's de ritten van de onderling gedeelde series op elkaar passen. Twee trajectcadansen, en hun tijdsdelta's passen pas op elkaar wanneer voor alle series die de twee trajectcadansen delen geldt dat de reispatronen op elkaar passen. Als voor alle trajecten die relevant zijn voor de knooppuntsegmentcadansen de trajectcadansen op elkaar passen, is dit een oplossing, en een geldige knooppuntsegmentcadans.

4.4 Opbouwen van partiële dienstregelingen

Voor het opbouwen van partiële dienstregelingen zijn twee stappen nodig:

- Het opsplitsen van het spoornetwerk in kleinere, onafhankelijke subnetwerken.
- Het per subnetwerk construeren van alle geldige combinaties van knooppuntsegmentcadansen.

Eerst worden alle subnetwerken geconstrueerd, zodat bekend is welke knooppuntsegmentcadansen met elkaar gecombineerd moeten worden. Het opbouwen van subnetwerken gebeurt door voor elk knooppuntsegment te kijken of er al een subnetwerk bestaat waar een van de aangrenzende trajecten in zit. Voor het eerste knooppuntsegment wordt sowieso een subnetwerk gemaakt. Elk knooppuntsegment dat op dit subnetwerk aan te sluiten is via een gedeeld traject wordt er ook aan toegevoegd. Als een knooppuntsegment niet toegevoegd kan worden slaan we dit nog even over. Als blijkt dat er in een iteratie geen knooppuntsegmenten meer zijn toegevoegd aan een subnetwerk, is dat subnetwerk klaar. Hierna nemen we een van de overgebleven knooppuntsegmenten, hier wordt een subnetwerk voor gemaakt, en we voegen knooppuntsegmenten toe die erop passen. Uiteindelijk zitten alle knooppuntsegmenten in een subnetwerk.

Hierna kunnen de knooppuntsegmentcadansen per subnetwerk aan elkaar gekoppeld worden. Dit kan slim aangepakt worden, door met de knooppuntsegmentcadansen te beginnen waarvoor de minste oplossingen gevonden zijn. De controle of knooppuntsegmentcadansen op elkaar aansluiten is relatief eenvoudig: wanneer zij voor elk gedeeld aangrenzend traject een trajectcadans met dezelfde tijdsdelta delen, passen ze op elkaar. Door te beginnen bij het knooppuntsegment waarvoor de minste knooppuntsegmentcadansen gevonden zijn, worden oplossingen die niet voor het volledige subnetwerk op elkaar kunnen passen zo veel mogelijk vanaf het begin uitgesloten.

Elke gevonden oplossing is een partiële dienstregeling: een geldige conflictvrije oplossing voor dat stuk van het netwerk.

4.5 Opbouwen van volledige dienstregelingen

Omdat elke partiële dienstregeling voor een subnetwerk op zichzelf een geldige dienstregeling beschrijft voor dat stuk van het netwerk, en de subnetwerken onafhankelijk van elkaar zijn, beschrijft elke combinatie van partiële dienstregelingen, één voor elk onderdeel van het netwerk, een geldige

oplossing voor het geheel. Een volledige dienstregeling is dan ook niet meer dan een selectie van partiële dienstregelingen. Los van de benodigde tijd, is het opsommen van alle dienstregelingen dan ook triviaal.

Omdat het aantal partiële dienstregelingen dat gecombineerd kan worden snel explodeert, wordt tijdens de evaluatie van de partiële dienstregelingen een selectie gemaakt welke partiële dienstregelingen in aanmerking komen om gecombineerd te worden tot gehele dienstregelingen. Als gevolg hiervan loopt de constructie en evaluatie van dienstregelingen gedeeltelijk door elkaar heen. Partiële dienstregelingen worden tijdens de constructie ervan al beoordeeld of ze bewaard zullen worden of niet, om later te combineren tot volledige dienstregelingen.

5 Het evalueren van dienstregelingen

Het evalueren van dienstregelingen zal gebeuren door reizen te maken door het netwerk waarvoor de dienstregeling geconstrueerd is, en de eigenschappen en statistieken van deze reizen te vergelijken.

5.1 Hoe ziet de evaluatie eruit

Er worden datasets voor alle dienstregelingen gegenereerd, aan de hand van vijf verschillende verzamelingen reizen. Voor elke verzameling is een percentage ingesteld hoeveel van de start- en eindpunten van de reis een knooppuntstation moeten zijn. Als dit percentage bijvoorbeeld 25% is, dan zijn 25% van de start- en eindpunten van reizen knooppuntstations. De rest van de start- en eindpunten zullen geen knooppuntstations zijn. Dit zijn stations die op een traject liggen. Afgezien van het percentage van de start- en eindpunten die wel of geen knooppuntstations zijn, worden stations random geselecteerd. Elke verzameling zal bestaan uit 50 reizen.

De vijf verzamelingen zijn als volgt:

- Een verzameling reizen waarvan alle start- en eindpunten geen knooppuntstations zijn
- Een verzameling reizen waarvan 25% van de start- en eindpunten knooppuntstations zijn
- Een verzameling reizen waarvan 50% van de start- en eindpunten knooppuntstations zijn
- Een verzameling reizen waarvan 75% van de start- en eindpunten knooppuntstations zijn
- Een verzameling reizen waarvan alle start- en eindpunten knooppuntstations zijn

Om de vergelijking van verschillende (partiële) dienstregelingen zo eerlijk mogelijk te maken en mogelijke natuurlijke variatie in de random sets uit te sluiten, zullen de verschillende verzamelingen reizen van tevoren gegenereerd worden, waarna elke (partiële) dienstregeling geëvalueerd zal worden met dezelfde verzameling reizen. Deze verzamelingen reizen worden vanaf hier reispakketten genoemd.

Zoals gemeld in Paragraaf 3.3 zal voor elke reis alleen de beste reisoctie (op basis van de Gegeneraliseerde Reistijd) gebruikt worden om de reis te beoordelen.

Voor elk van de programmastappen, het evalueren van partiële dienstregelingen, het evalueren van volledige dienstregelingen, en het herevalueren van dienstregelingen, zullen verse reispakketten gegenereerd worden. Dit is om het risico op overfitting op de reispakketten te voorkomen, en de robuustheid van de dienstregeling te bevorderen.

5.2 Het vinden van de beste reisoctie

Het vinden van de beste reisoctie lijkt sterk op het vinden van het kortste pad tussen twee punten. Hierbij kan meteen gedacht worden aan algoritmes zoals die van [Dijkstra] en [Floyd]. Er is echter een aantal verschillen. Hier zal, na de beschrijving, op ingegaan worden.

Gegeven twee stations is het doel om de beste reisoctie te vinden tussen de twee stations. De dienstregeling voor het (sub)netwerk is ook bekend.

Het algoritme voert de volgende stappen uit:

1. Op het station waar we nu zijn, bekijken we de vertrekstaat⁷.
2. Als onze bestemming op een aangrenzend traject ligt (in het geval dat we in een knooppunt zijn) of op hetzelfde traject ligt (in het geval dat we op een station binnen een traject zijn), dan nemen we altijd een trein die ons naar onze bestemming brengt. In zo'n geval is er duidelijk maar één optie: de trein die rechtstreeks naar het station rijdt⁸.
3. Als dit niet het geval is, nemen we elke trein die ons naar een (ander) knooppunt brengt. Als er meerdere treinen genomen kunnen worden, wordt elke mogelijke reis vastgelegd.
4. Zolang er nog deelreizen zijn worden deze één iteratie verder ontwikkeld, door bovenstaande stappen te herhalen.
5. Wanneer er een reis naar de bestemming gevonden is, wordt deze vergeleken met de reis die we al gevonden hebben (als er al een gevonden was), en alle deelreizen die niet meer potentieel beter kunnen zijn dan de reis die we nu hebben worden weggegooid.
6. Alle resterende reizen worden volgens de eerdere stappen van dit algoritme uitgewerkt totdat ze of de bestemming bereiken met een betere score dan de reis die we tot dan toe gevonden hadden, of niet meer beter kunnen zijn dan de reis die al gevonden was.
7. Uiteindelijk blijft alleen de beste reis over.

Dit heeft wat weg van het algoritme van Dijkstra, en misschien zelfs nog iets meer van Breadth-First Search, maar tegelijkertijd zijn er verschillen. Afhankelijk van de dienstregeling hoeft de snelste deelreis naar een tussenstation geen onderdeel te zijn van de beste reis naar ons gewenste eindstation. Het is namelijk goed mogelijk dat er twee treinen naar een knooppunt rijden, en dat de bestemming op een traject achter dat knooppunt ligt. Als de eerste trein genomen wordt, moet er overgestapt worden in het knooppunt. Wanneer de tweede trein richting het knooppunt genomen wordt, dan hoeft er niet overgestapt te worden. Omdat reizen onderling beoordeeld worden op hun Gegeneraliseerde Reistijd, kan de latere, langzamere trein uiteindelijk als beste optie aangemerkt worden. Een langzamere trein kan ook de betere optie zijn, wanneer deze later vertrekt, en op tijd aankomt op het station om een overstap te halen. Als dit voor een kortere overstaptijd zorgt, kan een langzamere deelreis toch de betere optie zijn. Hieruit blijkt dat het ook belangrijk is hoe we in een bepaald knooppunt gekomen zijn. Daardoor is het op voorhand niet mogelijk om een deelreis weg te gooien als een andere deelreis een snellere verbinding zou zijn tussen twee stations. Dit staat in contrast met de algoritmes van Dijkstra en Floyd, waar wordt aangenomen dat de beste deelreis altijd onderdeel zal zijn van de beste reis.

Als twee reizen vanaf hetzelfde station dezelfde trein gebruiken voor het volgende stuk van de reis, dan kan er voor deze deelreizen bepaald worden welke het snelste is. Hiervoor gebruiken we

⁷De vertrekstaat houdt hier een overzicht van vertrekkende treinen in.

⁸Theoretisch is het mogelijk dat dit niet de snelste trein is. Praktisch gezien zou dit een bizarre situatie zijn.

de Gegeneraliseerde Reistijd, van de twee deelreizen en het vervolg van de reizen, maar met de overstaptijd en wachttijd inbegrepen, dus zonder de reistijd van het vervolg van de twee reizen. Dit geeft een indruk wat de scores van de reizen zijn, mét het overstappen inbegrepen. Hierdoor is het wél mogelijk om de beste deelreis te selecteren, en te snijden in de deelreizen die nog verder uitgewerkt moeten worden.

5.3 Evaluatie van partiële dienstregelingen

Naar verwachting zullen er veel partiële dienstregelingen zijn. Hoe geschikt deze geacht worden zal ook ver uiteen lopen. Om in een latere fase werk te besparen is het van belang om deze partiële dienstregelingen te evalueren, zodat later alleen dienstregelingen geconstrueerd kunnen worden met partiële dienstregelingen die interessant geacht worden. De selectie zal plaatsvinden op basis van de Gegeneraliseerde Reistijd; de scores van alle gemaakte reizen worden bij elkaar opgeteld. Hoe korter de reizen samen duren, hoe beter we de partiële dienstregeling vinden. Omdat een partiële dienstregeling voor het deel van het netwerk dat deze omvat een geldige dienstregeling is, kan een partiële dienstregeling op dezelfde wijze geëvalueerd worden als een volledige dienstregeling. Door reizen te maken binnen het netwerk waarvoor de dienstregeling geldt, kunnen er uitspraken gedaan worden over de eigenschappen van een partiële dienstregeling, zoals de gemiddelde reistijd, aantal overstappen, gemiddelde overstaptijd (per station), als ook andere eigenschappen.

Echter is deze aanpak niet zonder risico's. Het is goed mogelijk dat het combineren van de twee beste partiële dienstregelingen voor twee te combineren subnetwerken niet leidt tot een van de beste of zelfs betere dienstregelingen voor de twee subnetwerken tezamen. Behalve het kunnen proberen van meer combinaties van partiële dienstregelingen is er weinig mogelijk om vroegtijdig te weten te komen hoe goed twee partiële dienstregelingen op elkaar aansluiten. Eventueel zou de „aansluitbaarheid” (de kwaliteit van het overstappen tussen de twee partiële dienstregelingen) van een partiële dienstregeling op aangrenzende subnetwerken meegenomen kunnen worden in het berekenen van de score van een partiële dienstregeling. Dit is alleen niet geïmplementeerd in het programma.

Na evaluatie zullen er drie verzamelingen van partiële dienstregelingen geselecteerd worden voor elke verzameling reizen:

- Een verzameling van de beste partiële dienstregelingen.
- Een verzameling van de slechtste partiële dienstregelingen.
- Een random verzameling partiële dienstregelingen.

In principe is alleen de verzameling van beste partiële dienstregelingen interessant. De andere verzamelingen zijn er om te bepalen hoeveel effect het selecteren van de beste partiële dienstregelingen heeft op de uiteindelijke dienstregelingen. Random kan beschouwd worden als een soort baseline, „het überhaupt vinden van een dienstregeling”, terwijl de verzameling met de slechtste partiële dienstregelingen gebruikt kan worden om te kijken in hoeverre de hiermee geconstrueerde dienstregelingen daadwerkelijk de prestaties van de partiële dienstregelingen volgen.

Elke verzameling zal 16 dienstregelingen bevatten. Deze verzamelingen zullen worden gebruikt om gehele dienstregelingen mee op te bouwen. In totaal levert dit $3 \times 5 = 15$ verschillende selecties van partiële dienstregelingen op: 3 soorten verzamelingen die voor elk van de 5 reispakketten geëvalueerd zijn.

5.4 Evaluatie van dienstregelingen

De evaluatie van gehele dienstregelingen werkt hetzelfde als die van partiële dienstregelingen. Elk van de drie verzamelingen partiële dienstregelingen wordt op consistente wijze met elkaar gecombineerd. Dat wil zeggen dat partiële dienstregelingen alleen gecombineerd worden met partiële dienstregelingen binnen dezelfde selectie. Vervolgens stellen we voor elk van de vijf reispakketten vijf verzamelingen dienstregelingen samen:

- De beste dienstregelingen opgebouwd uit de beste partiële dienstregelingen.
- De beste dienstregelingen opgebouwd uit de slechtste partiële dienstregelingen.
- De slechtste dienstregelingen opgebouwd uit de slechtste partiële dienstregelingen.
- Random Dienstregelingen opgebouwd uit random partiële dienstregelingen.
- De beste dienstregelingen opgebouwd uit random partiële dienstregelingen.

5.5 Wat wordt er gemeten?

Voor de verschillende dienstregelingen worden de volgende eigenschappen in de resultaten weergegeven:

- Reisduur: Dit is de tijd tussen het vertrekken van de trein op het station aan het begin van de reis, en het aankomen van de trein op het station aan het eind van de reis.
- Tijd onderweg: Dit is het deel van de reisduur waar men daadwerkelijk in een trein zit, en ook onderweg is.
- Wachtijd: Dit is de tijd dat een reiziger bezig is met overstappen en wachten op stations tussen treinen.
- Overstaps: Het gemiddeld aantal keer dat er wordt overgestapt in een reis. Als hier één bij opgeteld wordt vertelt dit het gemiddelde aantal treinen dat een reis bevat.
- Generaliseerde Reistijd: Zie de berekening in Figuur 4.
- Standaarddeviatie: De standaarddeviatie van de generaliseerde reistijden, gemiddeld over alle reizen van de dienstregelingen.
- Reisafstand: De gemiddelde afstand van de reizen. Dit kan variëren doordat reizen verschillende begin- en eindstations hebben, als ook door de route die genomen wordt tussen de twee stations.
- Snelheid: De gemiddelde snelheid voor de reizen binnen een dienstregeling. Hier is dat $(\text{Reisafstand} / \text{Reisduur})$.

Wat de gemiddelde reiziger betreft: hoe korter de reisduur, hoe beter. Dit wordt uitgedrukt in de Generaliseerde reistijd.

Verdere evaluatie

Er zal ook gekeken worden naar hoe een dienstregeling scoort wanneer er een reispakket gebruikt wordt waarmee de dienstregeling nog niet beoordeeld is. Dit houdt bijvoorbeeld in dat een dienstregeling die oorspronkelijk geëvalueerd is met een reispakket waar vooral reizen tussen knooppunten in zitten, ook geëvalueerd zal worden met een reispakket dat alleen reizen tussen kleine stations bevat. Merk op dat er vijf verschillende reispakketten zijn, met verschillende verhoudingen of reizen wel of niet op een knooppunt beginnen of eindigen. Er zal als volgt getest worden:

- Dienstregelingen die geconstrueerd zijn voor reizen tussen alleen kleinere stations of 50% knooppunten worden opnieuw getest met reizen die alleen van en naar knooppunten gaan.
- Dienstregelingen die geconstrueerd zijn voor reizen tussen alleen knooppunten of 50% knooppunten worden opnieuw getest met reizen tussen alleen kleinere stations.

6 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten per soort dienstregeling getoond, en worden enkele observaties gemaakt over de data en hoe dit zich tot elkaar verhoudt.

6.1 De beste dienstregelingen

Tabel 5 bevat gemiddeldes van de 30 beste dienstregelingen voor het netwerk, na het combineren van de 16 beste partiële dienstregelingen voor elk subnetwerk, beoordeeld met een verzameling van 50 reizen.

% Knooppunten		0%	25%	50%	75%	100%
Eigenschap						
Reisduur	(min)	27:55	28:14	28:46	27:16	23:04
Tijd onderweg	(min)	22:37	23:34	23:47	23:21	21:18
Wachttijd	(min)	5:18	4:39	4:59	3:54	1:45
# Overstaps		1.32	1.30	1.17	1.06	0.72
Gegen. Reistijd	(min)	42:26	42:32	41:37	38:57	30:57
Standaarddeviatie	(min)	0:06	0:05	0:05	0:06	0:05
Reisafstand	(km)	33.93	35.23	36.96	40.12	37.06
Snelheid	(km/u)	72.93	74.89	77.07	88.30	96.43

Tabel 5: De resultaten van de beste dienstregelingen.

Wat bij deze dienstregelingen opvalt is dat de reistijd afneemt naarmate er meer tussen knooppunten gereisd wordt, terwijl de reisafstand niet veel verandert. Dit komt omdat het aantal overstaps, en daarmee de wachttijd, afneemt.

6.2 De beste slechtste dienstregelingen

Tabel 6 bevat gemiddeldes van de 30 slechtste dienstregelingen voor het netwerk, na het combineren van de 16 slechtste partiële dienstregelingen voor elk subnetwerk, beoordeeld met een verzameling van 50 reizen.

In vergelijking met de beste dienstregelingen zien we hier dat de Gegeneraliseerde Reistijd gemiddeld hoger ligt. Dit heeft ermee te maken dat de dienstregelingen zijn opgebouwd uit de slechtste dienstregelingen. Overstaps binnen één partiële dienstregeling zullen vaak slecht uitpakken.

6.3 De slechtste dienstregelingen

Tabel 7 bevat gemiddeldes van de 30 slechtste dienstregelingen voor het netwerk, na het combineren van de 16 slechtste partiële dienstregelingen voor elk subnetwerk, beoordeeld met een verzameling van 50 reizen.

In contrast met de beste slechtste dienstregelingen is het overstappen tussen verschillende dienstregelingen hier ook verre van optimaal. Hierdoor stijgt de Gegeneraliseerde Reistijd nog wat verder, omdat de overstaps nog slechter zijn.

% Knooppunten		0%	25%	50%	75%	100%
Eigenschap						
Reisduur	(min)	30:09	30:53	31:08	28:35	24:47
Tijd onderweg	(min)	23:19	23:09	23:55	23:25	20:50
Wachttijd	(min)	6:50	7:44	7:13	5:10	3:57
# Overstaps		1.28	1.27	1.19	1.10	0.73
Gegen. Reistijd	(min)	44:14	44:49	44:15	40:38	32:51
Standaarddeviatie	(min)	0:07	0:01	0:03	0:04	0:05
Reisafstand	(km)	35.25	34.43	36.65	39.71	36.28
Snelheid	(km/u)	70.13	66.89	70.63	83.37	87.81

Tabel 6: De resultaten van de beste slechte dienstregelingen.

% Knooppunten		0%	25%	50%	75%	100%
Eigenschap						
Reisduur	(min)	43:56	42:55	44:50	42:26	34:33
Tijd onderweg	(min)	23:26	25:22	25:58	24:56	22:25
Wachttijd	(min)	20:30	17:33	18:52	17:29	12:08
# Overstaps		1.25	1.20	1.14	1.03	0.69
Gegen. Reistijd	(min)	57:41	56:07	57:22	53:47	42:10
Standaarddeviatie	(min)	0:21	0:05	0:06	0:26	0:06
Reisafstand	(km)	35.06	38.02	38.77	40.59	37.05
Snelheid	(km/u)	47.88	53.15	51.90	57.40	64.33

Tabel 7: De resultaten van de slechtste van slechte dienstregelingen.

6.4 De beste random dienstregelingen

Tabel 8 bevat gemiddeldes van de 30 beste dienstregelingen voor het netwerk, na het combineren van 16 random geselecteerde partiële dienstregelingen voor elk subnetwerk, beoordeeld met een verzameling van 50 reizen.

Op het eerste gezicht lijken de beste random dienstregelingen niet veel onder te doen voor de beste dienstregelingen.

6.5 De random dienstregelingen

Tabel 9 bevat gemiddeldes van 30 random bewaarde dienstregelingen voor het netwerk, na het combineren van 16 random geselecteerde partiële dienstregelingen voor elk subnetwerk, beoordeeld met een verzameling van 50 reizen.

In vergelijking met de beste random dienstregeling wordt duidelijk dat het evalueren van de dienstregelingen wel degelijk zin heeft. Random dienstregelingen zijn gemiddeld genomen niet erg goed te noemen, en er veel variatie binnen elke groep, wat terug te zien is in de hoge standaarddeviatie.

% Knooppunten		0%	25%	50%	75%	100%
Eigenschap						
Reisduur	(min)	28:06	28:33	28:24	26:50	23:01
Tijd onderweg	(min)	22:52	23:04	23:30	23:27	21:21
Wachttijd	(min)	5:14	5:29	4:54	3:23	1:40
# Overstaps		1.27	1.29	1.20	1.09	0.72
Gegen. Reistijd	(min)	42:03	42:43	41:36	38:47	30:57
Standaarddeviatie	(min)	0:15	0:11	0:15	0:11	0:04
Reisafstand	(km)	34.72	34.40	37.16	40.24	36.66
Snelheid	(km/u)	74.14	72.30	78.50	89.96	95.54

Tabel 8: De resultaten van de beste random dienstregelingen.

% Knooppunten		0%	25%	50%	75%	100%
Eigenschap						
Reisduur	(min)	36:02	34:47	36:04	33:44	27:56
Tijd onderweg	(min)	23:16	23:23	25:12	24:21	22:16
Wachttijd	(min)	12:47	11:24	10:52	9:22	5:41
# Overstaps		1.27	1.26	1.19	1.05	0.71
Gegen. Reistijd	(min)	50:01	48:41	49:06	45:18	35:44
Standaarddeviatie	(min)	1:41	2:06	1:52	1:56	1:30
Reisafstand	(km)	35.03	35.76	38.15	40.70	36.92
Snelheid	(km/u)	58.32	61.68	63.48	72.40	79.28

Tabel 9: De resultaten van de random dienstregelingen.

6.6 Observaties

De resultaten volgen grotendeels de intuïtie: de beste dienstregelingen hebben gemiddeld genomen lagere gegeneraliseerde reistijden. De verschillen zijn echter niet zo groot als verwacht zou worden. Bij de constructie van de slechtste dienstregelingen, te zien in Tabel 7, valt op te merken dat de dienstregelingen een stuk onder de andere dienstregelingen presteren.

Iets dat opvalt is dat het aantal overstaps per reis lager lijkt te zijn wanneer er alleen tussen knooppunten gereisd wordt. Dit kan waarschijnlijk verklaard worden doordat reizen tussen knooppunten vaker gebruik kunnen maken van dezelfde trein. Voor een reis die een niet-knooppunt als vertrek- of aankomstplaats heeft zal er vaker overgestapt moeten worden in een knooppunt om in een trein te komen die de juiste kant op gaat. Ook is te zien dat de gemiddelde wachttijd bij de beste slechtste dienstregelingen en de slechtste dienstregelingen veel hoger is dan bij de beste dienstregelingen; in deze dienstregelingen zijn de aansluitingen verre van optimaal te noemen. Het aantal keer overstappen en de wachttijd nemen in grote lijnen wel weer af naarmate er meer tussen alleen knooppunten gereisd wordt.

Soort dienstregeling	B	BS	SS	BR	R
Eigenschap					
Reisduur (min)	27:55	30:09	43:56	28:06	36:02
Tijd onderweg (min)	22:37	23:19	23:26	22:52	23:16
Wachttijd (min)	5:18	6:50	20:30	5:14	12:47
# Overstaps	1.32	1.28	1.25	1.27	1.27
Gegen. Reistijd (min)	42:26	44:14	57:41	42:03	50:01
Standaarddeviatie (min)	0:06	0:07	0:21	0:15	1:41
Reisafstand (km)	33.93	35.25	35.06	34.72	35.03
Snelheid (km/u)	72.93	70.13	47.88	74.14	58.32

Tabel 10: De resultaten van de 0% dienstregelingen.

Soort dienstregeling	B	BS	SS	BR	R
Eigenschap					
Reisduur (min)	28:14	30:53	42:55	28:33	34:47
Tijd onderweg (min)	23:34	23:09	25:22	23:04	23:23
Wachttijd (min)	4:39	7:44	17:33	5:29	11:24
# Overstaps	1.30	1.27	1.20	1.29	1.26
Gegen. Reistijd (min)	42:32	44:49	56:07	42:43	48:41
Standaarddeviatie (min)	0:05	0:01	0:05	0:11	2:06
Reisafstand (km)	35.23	34.43	38.02	34.40	35.76
Snelheid (km/u)	74.89	66.89	53.15	72.30	61.68

Tabel 11: De resultaten van de 25% dienstregelingen.

Het is logisch dat de gemiddelde reisduur daalt wanneer er alleen tussen knooppunten gereisd wordt; dit ligt in lijn met de resultaten van hiervoor. Wat echter opvalt is dat de onderlinge verschillen tussen de verzamelingen erg klein lijken.

Het is ook opmerkelijk dat de reisafstand enigszins varieert tussen de verschillende reispakketten. Dit lijkt enerzijds te verklaren doordat elk reispakket andere reizen bevat, en anderzijds doordat afhankelijk van de dienstregeling voor sommige reizen een andere route gekozen wordt.

Om verschillende soorten dienstregelingen voor hetzelfde reispakket gemakkelijk met elkaar te kunnen vergelijken, zijn Tabellen 10 tot en met 14 inbegrepen.

6.7 Dienstregelingen met afwijkende reispakketten

Bepaalde dienstregelingen worden ook opnieuw geëvalueerd met reispakketten waarvoor ze niet ontwikkeld zijn. Dit gebeurt met dezelfde verzamelingen van 30 dienstregelingen. Zie Tabellen 15 en 16.

Soort dienstregeling	B	BS	SS	BR	R
Eigenschap					
Reisduur (min)	28:46	31:08	44:50	28:24	36:04
Tijd onderweg (min)	23:47	23:55	25:58	23:30	25:12
Wachttijd (min)	4:59	7:13	18:52	4:54	10:52
# Overstaps	1.17	1.19	1.14	1.20	1.19
Gegen. Reistijd (min)	41:37	44:15	57:22	41:36	49:06
Standaarddeviatie (min)	0:05	0:03	0:06	0:15	1:52
Reisafstand (km)	36.96	36.65	38.77	37.16	38.15
Snelheid (km/u)	77.07	70.63	51.90	78.50	63.48

Tabel 12: De resultaten van de 50% dienstregelingen.

Soort dienstregeling	B	BS	SS	BR	R
Eigenschap					
Reisduur (min)	27:16	28:35	42:26	26:50	33:44
Tijd onderweg (min)	23:21	23:25	24:56	23:27	24:21
Wachttijd (min)	3:54	5:10	17:29	3:23	9:22
# Overstaps	1.06	1.10	1.03	1.09	1.05
Gegen. Reistijd (min)	38:57	40:38	53:47	38:47	45:18
Standaarddeviatie (min)	0:06	0:04	0:26	0:11	1:56
Reisafstand (km)	40.12	39.71	40.59	40.24	40.70
Snelheid (km/u)	88.30	83.37	57.40	89.96	72.40

Tabel 13: De resultaten van de 75% dienstregelingen.

Bij de herevaluatie vallen een paar dingen op:

Bij de herevaluatie van de beste dienstregelingen met 100% knooppunten lijken de dienstregelingen die oorspronkelijk met 50% knooppunten geëvalueerd zijn het beter te doen dan verwacht, maar niet bij een herevaluatie met 0% knooppunten. De verwachting was dat dit niet het geval zou zijn, en de 50% dienstregelingen het slechter zou doen, omdat ze voor een andere verzamelingen reizen geoptimaliseerd zijn.

Hetzelfde kan ook gezegd worden voor de dienstregelingen die oorspronkelijk met 0% en 100% knooppunten geëvalueerd zijn. Het lijkt alsof de beste dienstregelingen, geëvalueerd met 0% knooppunten, zich ook goed lenen voor reizen die enkel tussen knooppunten worden gemaakt. De 50% knooppunten doen juist iets onder voor de referentie dienstregelingen. Bij de beste slechtste dienstregelingen lijkt dit niet zo zichtbaar te zijn, met het verschil dat de dienstregelingen met 50% knooppunten het ook minder goed doen bij herevaluatie met 0% knooppunten.

Soort dienstregeling	B	BS	SS	BR	R
Eigenschap					
Reisduur (min)	23:04	24:47	34:33	23:01	27:56
Tijd onderweg (min)	21:18	20:50	22:25	21:21	22:16
Wachttijd (min)	1:45	3:57	12:08	1:40	5:41
# Overstaps	0.72	0.73	0.69	0.72	0.71
Gegen. Reistijd (min)	30:57	32:51	42:10	30:57	35:44
Standaarddeviatie (min)	0:05	0:05	0:06	0:04	1:30
Reisafstand (km)	37.06	36.28	37.05	36.66	36.92
Snelheid (km/u)	96.43	87.81	64.33	95.54	79.28

Tabel 14: De resultaten van de 100% dienstregelingen.

Onder de slechtste dienstregelingen valt iets anders op: De dienstregelingen die oorspronkelijk met 0% knooppunten geëvalueerd zijn doen het beter. Dit ligt in de lijn der verwachting. De slechtste dienstregelingen zijn als het ware geoptimaliseerd om zo slecht mogelijk te zijn, dus andere reispakketten zouden het daardoor juist beter moeten doen. Dit komt omdat de slechtste dienstregeling voor 0% knooppunten niet uitsluit dat dit ook de slechtste dienstregeling voor 100% knooppunten zou zijn. Omdat de dienstregeling dus niet zo slecht mogelijk is gemaakt voor de andere reispakketten is het aannemelijk dat de slechtste dienstregelingen hier beter presteren.

De data van de beste random dienstregelingen volgen de verwachtingen: De referentie doet het het best, dan de 50% dienstregelingen, en dan de 0% of 100% (afhankelijk van de herevaluatie die we bekijken). Hier zijn geen opvallende trends te vinden.

Als laatste is onder de random random dienstregelingen te zien dat de verschillende soorten dienstregelingen bijna geen onderlinge verschillen vertonen. Dit valt te verwachten, omdat deze dienstregelingen random gekozen zijn, en niet perse voor iets geoptimaliseerd zijn, waardoor de selectie van dienstregelingen binnen elke soort geen voorkeur geeft aan een bepaald soort reizen.

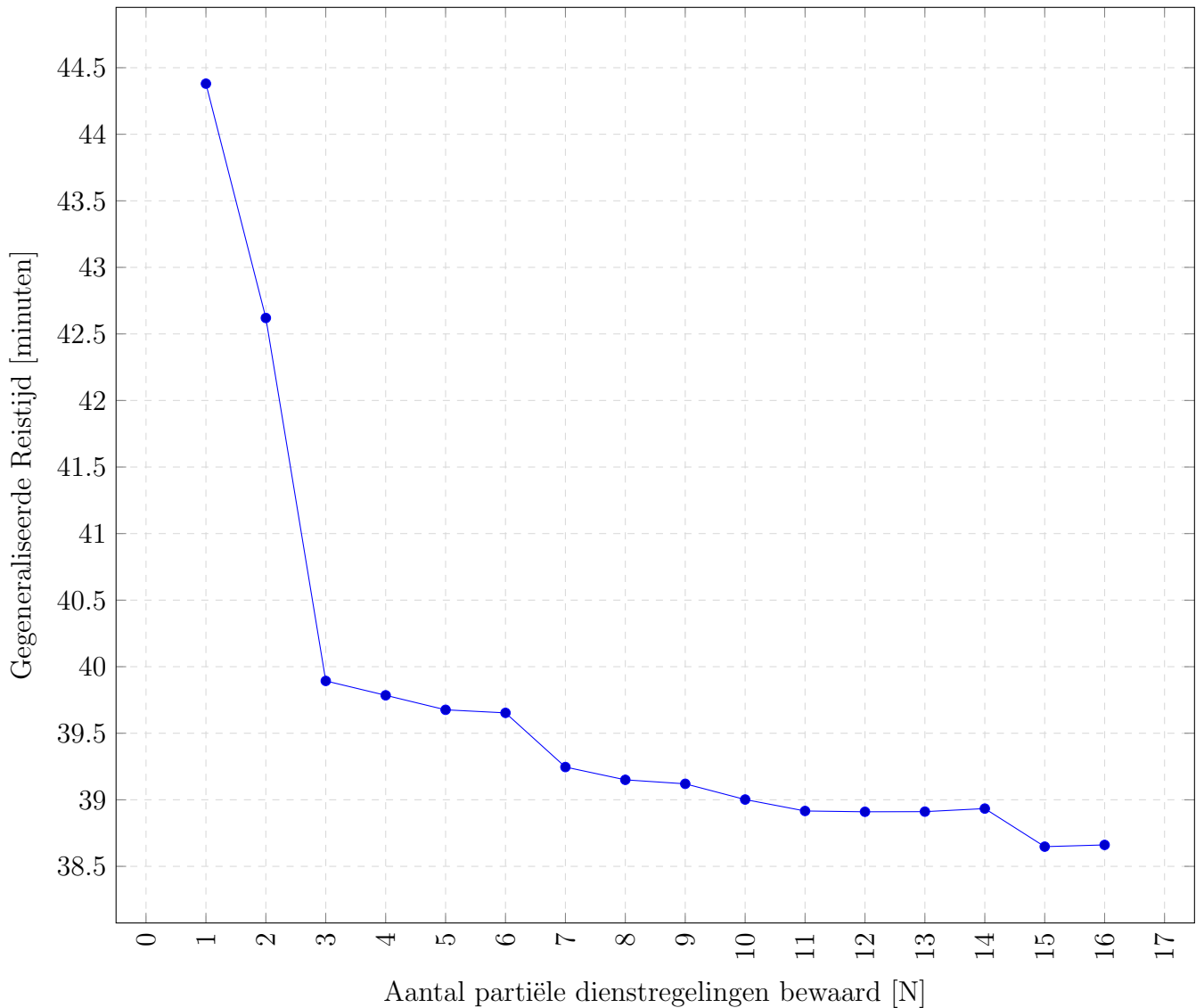
6.8 De effectiviteit van meer partiële dienstregelingen bewaren

We kunnen ook kijken naar de effectiviteit van het bewaren van verschillende aantallen partiële dienstregelingen. Deze data is zichtbaar gemaakt voor de verzamelingen reizen die beginnen en eindigen op knooppunten voor respectievelijk 0%, 50% en 100% van de tijd. Zie Figuren 5–7. De tabellen laten de scores zien van de dienstregelingen, wanneer ze met dezelfde reispakketten, maar verschillende aantallen partiële dienstregelingen bewaard, worden geconstrueerd en geëvalueerd. De grafieken tonen de gemiddelde Gegeneraliseerde Reistijd van de beste 30 dienstregelingen.

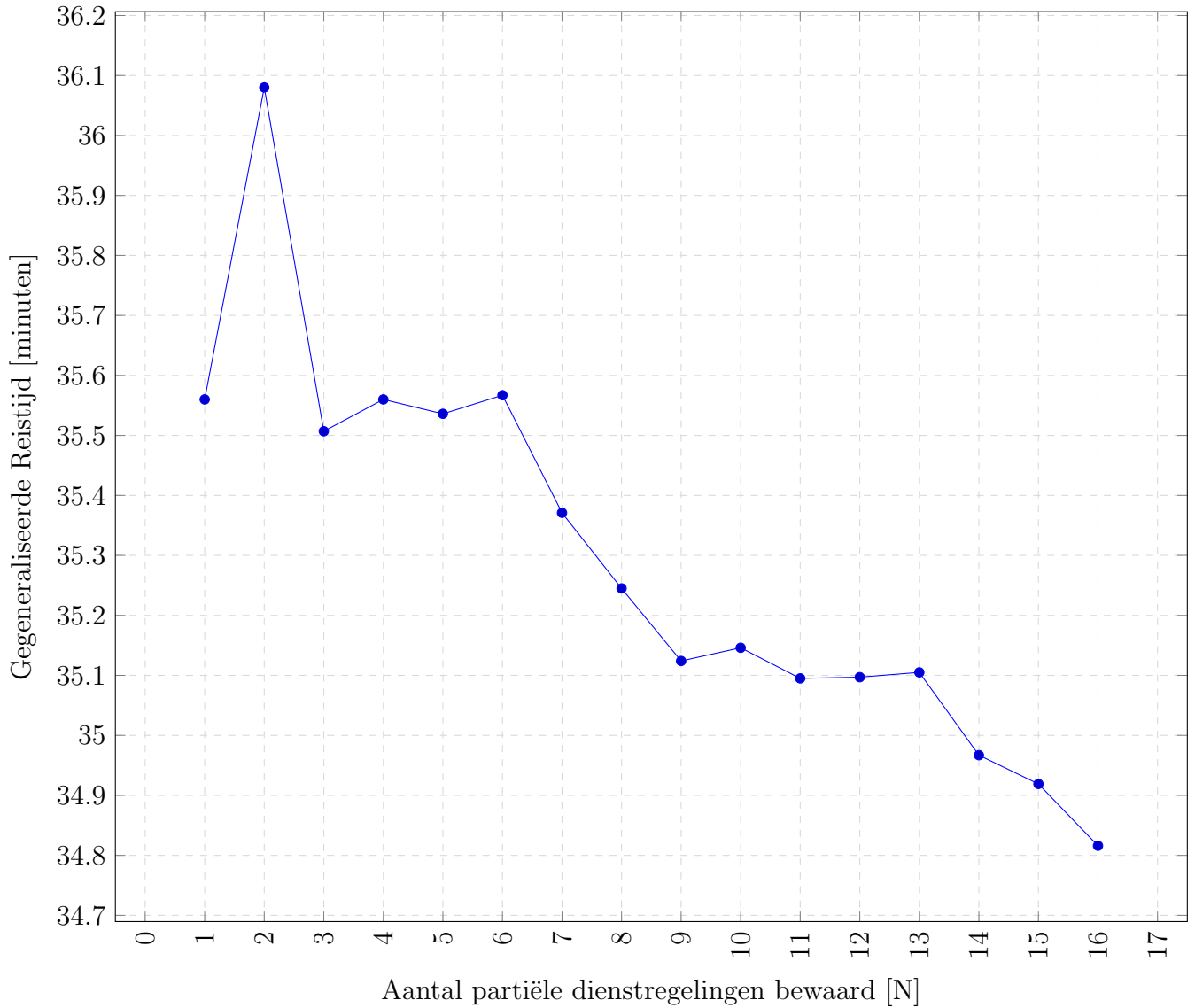
In de verschillende grafieken is te zien dat de trendlijn voor de gemiddelde Gegeneraliseerde reistijd soms iets omhoog springt. Dit heeft ermee te maken dat er bij twee gelijk scorende partiële dienstregelingen, en een volle selectie partiële dienstregelingen, er een kans is dat een dienstregeling wel of niet toegevoegd wordt. De beste 3 partiële dienstregelingen bevatten bijvoorbeeld niet perse

de twee dienstregelingen die geselecteerd zijn bij de beste 2 partiële dienstregelingen. Omdat er in de score van een partiële dienstregeling geen rekening wordt gehouden met hoe goed deze op andere partiële dienstregelingen aan zou sluiten, kunnen de resultaten voor dienstregelingen soms beter of slechter uitvallen dan bij een kleinere selectie partiële dienstregelingen.

In het algemeen heeft het dus zin om een selectie van meer partiële dienstregelingen te hanteren, al neemt de toegevoegde waarde van meer partiële dienstregelingen bewaren wel af naarmate er al meer partiële dienstregelingen bewaard werden.



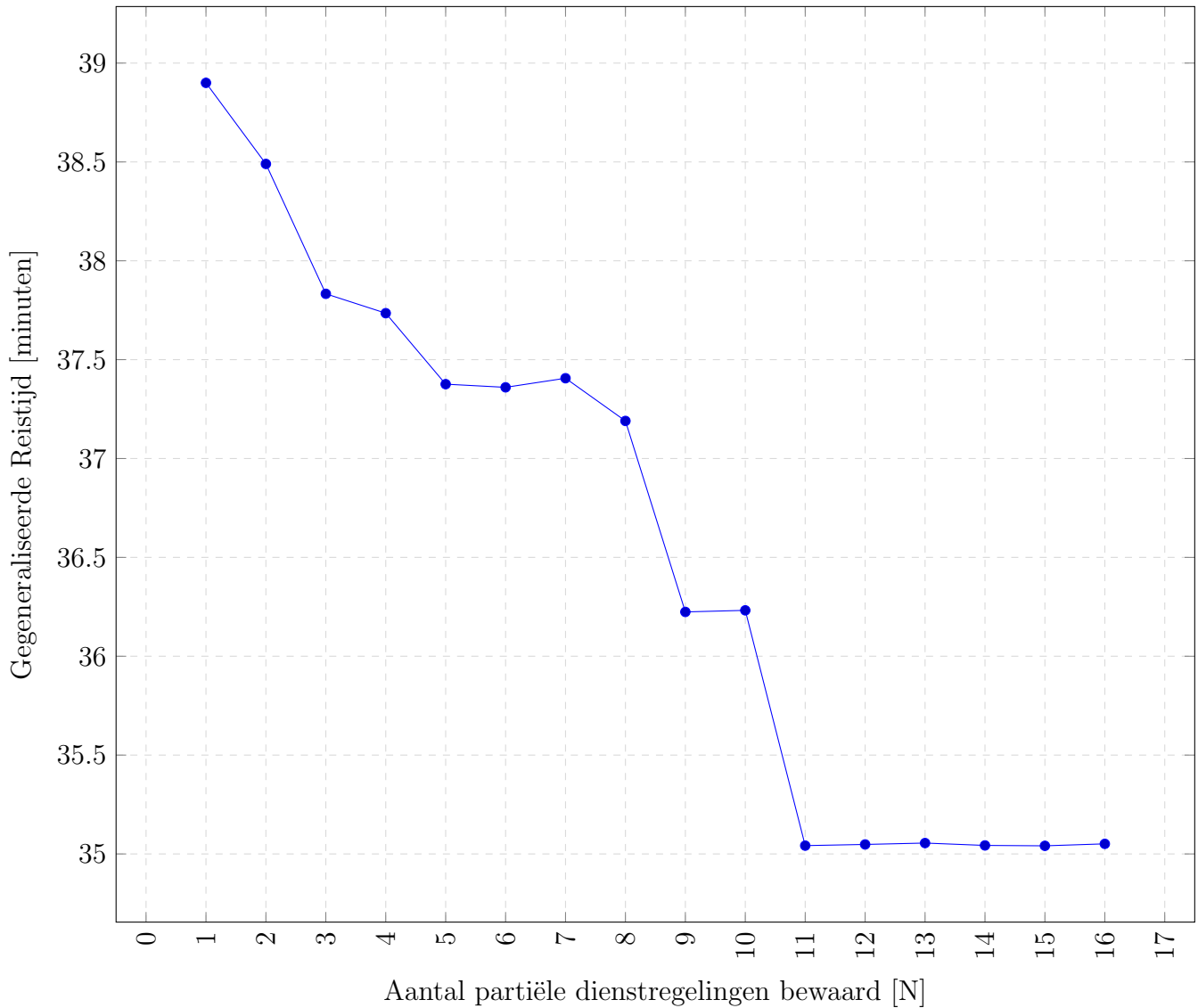
Figuur 5: De Gegeneraliseerde Reistijd van de beste dienstregelingen voor 0% reizen per aantal bewaarde partiële dienstregelingen.



Figuur 6: De Gegeneraliseerde Reistijd van de beste dienstregelingen voor 50% reizen per aantal bewaarde partiële dienstregelingen.

6.9 Metadata

In Tabel 17 is een overzicht van de prestaties van het programma te zien voor het in Paragraaf 3.1.4 beschreven netwerk. In de tabel is te zien hoelang elke stap van het programma grofweg duurt, als ook hoelang het construeren en evalueren duurt voor verschillende aantallen bewaarde partiële dienstregelingen. Wat hier het langste duurt is het combineren van de geselecteerde partiële dienstregelingen. De formule voor het aantal combinaties dat beoordeeld wordt is grofweg $\text{geselecteerde_oplossingen}^{\text{aantal_subnetwerken}}$. Bij 4 subnetwerken, met 3 geselecteerde oplossingen is dit nog te overzien. Wanneer er echter meer oplossingen bewaard worden, of meer subnetwerken, loop het aantal combinaties snel op. Bij 30 oplossingen, en 5 subnetwerken, waarbij het programma



Figuur 7: De Gegeneraliseerde Reistijd van de beste dienstregelingen voor 100% reizen per aantal bewaarde partiële dienstregelingen.

meer dan 10 oplossingen per seconde evalueert⁹, zal het programma circa 4250 uur moeten draaien. In die tijd wordt een dienstregeling gemaakt uit een combinatie van partiële dienstregelingen, en worden alle reizen van het reispakket uitgevoerd met de gevonden dienstregeling, en beoordeeld. Als laatste wordt er een score berekend voor de combinatie van deze dienstregeling met dit reispakket.

⁹Dit is een gemiddelde over de looptijd van het programma. Vanwege multithreading op subnetwerk niveau ligt de piek van het aantal oplossingen per seconde hoger dan dit. Naarmate het programma langer draait zijn alleen de subnetwerken met een grote zoekruimte nog actief. Dit representeert een lange staart in het genereren van oplossingen, waar minder oplossingen per seconde gevonden worden

Aantal oplossingen

In Tabel 18 is te zien hoeveel cadansen en partiële dienstregelingen er voor elk onderdeel van het netwerk gevonden zijn. Wanneer er voor een knooppuntsegment geen oplossingen bekend zijn (-), betekent dit dat er geen combinaties van verschillende trajectcadansen te maken zijn. Dit gebeurt wanneer een knooppuntsegment maar aan één traject grenst. Dit gebeurt bijvoorbeeld op kopstations, of stations waar alle treinen vanuit een bepaalde richting beginnen/eindigen of keren en terug in dezelfde richting rijden. Waar dit bij kopstations een gevolg van de infrastructuur is, is dit voor „normale”stations een gevolg van de dienstregeling. Voor zulke knooppuntsegmenten valt niets te berekenen, omdat er niet bepaald hoeft te worden hoe verschillende treinen met elkaar interacteren. Het aantal knooppuntsegmentcadansen is dit geval gelijk aan het aantal trajectcadansen van het ene traject.

Als er geen oplossingen gevonden worden voor een knooppuntsegment dat wél aan meerdere trajecten grenst, betekent dit dat het niet mogelijk is om een conflictvrije dienstregeling te construeren; er is immers geconstateerd dat elke combinatie voor dat knooppuntsegment een conflict bevat. In het gebruikte netwerk komt dit niet voor, er zijn volledige dienstregelingen geconstrueerd.

Soort dienstregeling	Beste		ref	Beste slechtste		ref	Slechtste		ref
% Knooppunten	0%	50%	100%	0%	50%	100%	0%	50%	100%
Eigenschap									
Reisduur (min)	21:58	24:11	22:47	24:21	25:19	23:22	28:11	28:53	29:19
Tijd onderweg (min)	20:24	20:27	20:25	21:23	20:55	20:13	21:13	22:07	21:37
Wachttijd (min)	1:34	3:44	2:22	2:58	4:24	3:09	6:59	6:46	7:42
# Overstaps	0.70	0.68	0.70	0.74	0.68	0.69	0.68	0.67	0.70
Gegen. Reistijd (min)	29:42	31:40	30:29	32:30	32:48	31:00	35:42	36:18	36:58
Standaarddeviatie (min)	0:28	0:22	0:30	0:07	0:07	0:26	0:56	0:50	0:39
Reisafstand (km)	37.00	37.18	37.04	36.01	36.88	36.31	37.01	38.02	36.97
Snelheid (km/u)	101.07	92.24	97.53	88.71	87.40	93.23	78.78	78.98	75.68

Soort dienstregeling	Beste random		ref	Random random		ref
% Knooppunten	0%	50%	100%	0%	50%	100%
Eigenschap						
Reisduur (min)	25:27	23:29	22:28	26:21	26:29	25:59
Tijd onderweg (min)	21:57	20:54	20:21	20:58	21:17	21:11
Wachttijd (min)	3:30	2:36	2:06	5:23	5:13	4:48
# Overstaps	0.69	0.69	0.68	0.68	0.69	0.69
Gegen. Reistijd (min)	33:02	31:06	29:57	33:52	34:04	33:37
Standaarddeviatie (min)	0:28	0:48	0:27	1:10	1:07	1:19
Reisafstand (km)	36.91	37.05	37.28	36.85	37.01	37.08
Snelheid (km/u)	87.02	94.62	99.58	83.91	83.84	85.63

Tabel 15: Resultaten van dienstregelingen die zijn geconstrueerd voor reizen met 0% of 50% knooppunten, wanneer ze opnieuw geëvalueerd worden met reizen met 100% knooppunten.

Soort dienstregeling	ref	Beste		ref	Beste slechtste		ref	Slechtste	
% Knooppunten	0%	50%	100%	0%	50%	100%	0%	50%	100%
Eigenschap									
Reisduur (min)	27:56	31:06	31:26	32:58	32:17	34:05	39:47	39:60	38:17
Tijd onderweg (min)	22:00	21:53	21:21	22:15	22:08	21:48	21:57	22:26	22:31
Wachttijd (min)	5:56	9:13	10:05	10:43	10:09	12:17	17:50	17:34	15:45
# Overstaps	1.26	1.20	1.24	1.24	1.19	1.23	1.21	1.18	1.20
Gegen. Reistijd (min)	41:46	44:18	45:02	46:37	45:20	47:36	53:07	52:57	51:32
Standaarddeviatie (min)	0:48	0:06	1:32	0:22	0:13	0:43	1:02	0:55	1:24
Reisafstand (km)	31.78	33.56	32.48	33.75	32.63	33.49	32.73	33.21	34.34
Snelheid (km/u)	68.26	64.75	61.99	61.40	60.65	58.95	49.36	49.82	53.83

Soort dienstregeling	ref	Beste random		ref	Random random	
% Knooppunten	0%	50%	100%	0%	50%	100%
Eigenschap						
Reisduur (min)	30:51	30:60	32:40	34:33	34:13	34:07
Tijd onderweg (min)	23:12	22:04	21:48	22:19	22:13	22:19
Wachttijd (min)	7:39	8:56	10:53	12:14	12:00	11:47
# Overstaps	1.16	1.23	1.25	1.21	1.21	1.21
Gegen. Reistijd (min)	43:37	44:30	46:25	47:48	47:29	47:25
Standaarddeviatie (min)	0:07	1:06	1:30	1:30	2:01	1:47
Reisafstand (km)	33.63	33.36	33.02	33.37	33.19	33.32
Snelheid (km/u)	65.41	64.57	60.65	57.95	58.19	58.61

Tabel 16: Resultaten van dienstregelingen die zijn geconstrueerd voor reizen met 50% of 100% knooppunten, wanneer ze opnieuw geëvalueerd worden met reizen met 0% knooppunten.

Onderdeel (Tijdsduur in mm:ss.ms)	alle aantallen
1. ConstructTrajectSolutions	ca. 00:00.03
2. ConstructKnooppuntSegmentSolutions	ca. 00:26.85
3. ConstructPartieleDienstregelingen	ca 02:14.85
5. Herevaluatie dienstregelingen	ca 00:15.73

4. ConstructDienstregelingen	Tijdsduur
3 partiële dienstregelingen bewaard	00:03:02.93
4 „ ”	00:05:23.54
5 „ ”	00:12:46.02
6 „ ”	00:32:46.32
7 „ ”	00:54:45.53
8 „ ”	01:33:35.04
9 „ ”	02:57:12.36
10 „ ”	04:52:34.60
11 „ ”	07:12:59.81
12 „ ”	09:10:21.55
13 „ ”	14:10:26.09
14 „ ”	16:25:30.14
15 „ ”	19:56:05.02
16 „ ”	28:11:08.03

Tabel 17: De tijdsduur per stap van het programma (C[#], Persoonlijke computer. AMD 5900X 3.7GHz 12C/24T, 64GB DDR4).

Trajectcadansen	
$[A_1] - [B_1]$	1
$[A_2] - [F_1]$	16
$[F_1] - [G_1]$	19
$[B_1] - [C_1]$	13
$[C_1] - [D_1]$	19
$[B_2] - [E_1]$	16
$[E_1] - [H_1]$	19
$[C_2] - [E_2]$	22
$[E_2] - [F_2]$	1
$[E_2] - [G_2]$	22
$[G_2] - [I_1]$	25
$[G_1] - [J_1]$	16
$[J_1] - [L_1]$	19
$[H_1] - [L_2]$	25
$[K_2] - [J_2]$	1
$[L_1] - [M_1]$	1
$[L_2] - [N_1]$	1

Cadansen per knooppuntsegment	
A_1	-
A_2	-
B_1	754
B_2	-
C_1	406
C_2	-
D_1	-
E_1	580
E_2	27588
F_1	116
F_2	-
G_1	17632
G_2	1276
H_1	27550
I_1	-
J_1	116
J_2	-
K_1	-
L_1	1102
L_2	1451
M_1	-
N_1	-

Partiële dienstregelingen per subnetwerk	
$A_1 - B_1 - C_1 - D_1$	399
$A_2 - F_1 - G_1 - J_1 - L_1 - M_1$	220
$B_2 - E_1 - H_1 - L_2 - N_1$	14020
$C_2 - E_2 - F_2 - G_2 - I_1$	27104
$J_2 - K_1$	60

Tabel 18: Oplossingen voor elk onderdeel.

7 Conclusie

We hebben onderzocht of het mogelijk is om conflictvrije dienstregelingen te construeren voor een spoornetwerk en een bekende capaciteitsbehoefte. Hierbij hebben we bepaalde eisen en beperkingen in acht genomen, zoals een vaste tijd tussen treinen van dezelfde serie. Ook hebben we onderzocht of het mogelijk is om uitspraken te doen over de geschiktheid van een dienstregeling, aan de hand van een aantal aspecten die we belangrijk achten voor dienstregelingen, zoals het minimaliseren van de Gegeneraliseerde Reistijd, een manier om verschillende reizen en reisopties met verschillende aantallen overstaps met elkaar te kunnen vergelijken.

Voor dit onderzoek hebben we een netwerk gebruikt met 51 stations, waarvan er 14 knooppunten zijn. Vijf van de knooppunten grenzen aan één baanvak, waardoor deze triviaal zijn. Het gebruikte netwerk valt uiteen in vijf subnetwerken.

Uit het onderzoek is gebleken dat er verschillen in prestaties te vinden zijn tussen dienstregelingen, wanneer deze op verschillende wijzen geconstrueerd worden. Eén van de kenmerkende verschillen is de doorgaans slechtere gemiddelde wachttijd bij dienstregelingen die uit slechtere, of random partiële dienstregelingen bestaan, als er overgestapt moet worden. Ook zijn er dienstregelingen opnieuw geëvalueerd met afwijkende reispakketten, om te zien hoe dienstregelingen presteerden bij reizen waar ze niet voor geoptimaliseerd waren. Bij de slechtste en random dienstregelingen is er net iets anders te zien. Bij de slechtste dienstregelingen presteren de opnieuw geëvalueerde dienstregelingen beter. De verklaring hiervoor is dat de slechtste dienstregeling geoptimaliseerd is om niet goed te zijn in wat deze doet. Het is aannemelijk dat een andere verzameling reizen, waar niet voor geoptimaliseerd is, minder slecht presteert. Bij de random dienstregelingen is geen serieus verschil te herkennen, wat in lijn ligt met de premisse van deze dienstregelingen. Bij de andere dienstregelingen komen de verschillen, hoewel klein (enkele minuten), wel consistent naar voren. Wanneer een dienstregeling beoordeeld wordt dient er rekening gehouden te worden met het reisgedrag binnen het netwerk; wanneer de reizen bekend zijn kan deze verzameling gebruikt worden om de dienstregelingen te beoordelen. Hiervoor is in het programma gebruik gemaakt van random gegenereerde reizen, waarbij de begin- en eindpunten van deze reizen in wisselende verhouding kleinere of grote stations zijn, waarbij er minder overstaps gemaakt worden als er enkel tussen grote stations wordt gereisd.

Er valt ook nog iets te zeggen over de invloed van het aantal partiële dienstregelingen waaruit de dienstregelingen geconstrueerd worden. Hoewel het effect van meer partiële dienstregelingen bewaren meetbaar is, is dit effect niet heel groot. Hier valt een afweging te maken tussen hoeveel een betere oplossing waard is, ten opzichte van de tijd die het programma extra moet draaien om tot een betere oplossing te kunnen komen.

Discussie en toekomstig werk

We hebben bij het onderzoek een aantal praktische keuzes gemaakt die het berekenen van dienstregelingen minder complex maken. Ook hebben we enkele inhoudelijke keuzes gemaakt, bijvoorbeeld als we geen realistische gegevens uit de treinreispraktijk hadden. Bij toekomstig onderzoek zouden daar andere keuzes gemaakt kunnen worden.

Opknippen van series

Een aantal series (11/12 en 13/14) waren oorspronkelijk één serie. Omdat er voor dit onderzoek niet met de wachttijd van treinen in stations gevarieerd is, is het niet mogelijk voor snellere treinen om langzamere treinen in te kunnen halen in een knooppunt, iets wat in de praktijk geregeld plaatsvindt. Door de vaste wachttijd op een station zullen snellere treinen altijd in conflict komen met de langzamere treinen. Voor de subnetwerken van series 11/12 en 13/14 konden geen dienstregelingen geconstrueerd worden wanneer deze series samen één serie vormden. Het opknippen van een serie kan overigens op twee manieren bekeken worden: er is daadwerkelijk sprake van twee verschillende series, of de splitsing van de serie in één van de stations impliceert dat de wachttijd in dat station wel mag variëren. Het programma werkt als het eerste, maar praktisch kan het net zo goed als het tweede beschouwd worden. Voor het beoordelen van reizen worden de verschillende series echter wel behandeld als twee aparte series, waar een overstap tussen zit.

Het selecteren van partiële dienstregelingen

Het selecteren van partiële dienstregelingen is binnen dit onderzoek gedaan op basis van de som van de gegeneraliseerde reistijden van alle reizen in het reispakket dat gebruikt werd voor het beoordelen van de dienstregeling. De score van een partiële dienstregeling (en ook dienstregelingen) had ook anders bepaald kunnen worden. Het idee achter de gekozen manier van evalueren is dat een kortere gegeneraliseerde reistijd het meest wenselijk zou zijn voor reizigers.

De verhouding van start- en eindpunten

Voor dit onderzoek is geen rekening gehouden met hoe realistisch het reisgedrag is. Waar in de praktijk veel sprake is van forensen, zijn de start- en eindpunten van de reizen waarmee de dienstregelingen beoordeeld zijn willekeurig gekozen. Hoewel dit gedeeltelijk afgevangen is door de kans dat een start- of eindpunt een knooppunt is te variëren, wordt er geen voorkeur gegeven aan het genereren van kortere of langere reizen. Het gevolg hiervan is dat de gegenereerde reizen om een dienstregeling mee te evalueren wellicht geen representatief gebruik van een dienstregeling reflecteren.

Het aantal sporen van een traject

Voor dit onderzoek is aangenomen dat alle trajecten twee sporen hebben, één spoor voor elk van de twee rijrichtingen. In de praktijk is dit niet altijd zo. Er zijn trajecten met slechts één spoor, drie sporen, vier sporen, of zelfs zes sporen.

De weerstand bij overstappen

De weerstand van 11 minuten die gebruikt wordt in de formule voor gegeneraliseerde reistijd is een enigszins arbitrair gekozen getal dat gebruikt is in de berekeningen van het RVM-model, zie [Sman, p. 67]. Er zou gevarieerd kunnen worden met de weerstand tot overstappen, wat de beste reis tussen twee stations zal beïnvloeden. In het algemeen wordt aangenomen dat een overstap ongeveer zo zwaar telt als 10–15 minuten extra reistijd. Een heel korte overstaptijd zal ook niet bevordelijk zijn voor de robuustheid van een dienstregeling.

Het kleinere netwerk

Het gebruik van een kleiner netwerk had niet de voorkeur. In eerste instantie was het de bedoeling om het gehele spoornetwerk van Nederland te gebruiken. Al snel werd duidelijk dat dit geen realistisch doel was; het Nederlandse spoornetwerk bestaat uit een handjevol kleine subnetwerken (vooral zijlijnen) en één subnetwerk met de rest van het netwerk. Elk extra knooppuntsegment in een subnetwerk vergroot de oplossingsruimte exponentieel. De subnetwerk-benadering zou dan ook sterk aangepast moeten worden om binnen redelijke tijd een oplossing te kunnen vinden voor een netwerk zoals het Nederlandse spoornetwerk.

Referenties

- [Caimi et al.] Gabrio Caimi, Leo Kroon, Christian Liebchen,
„Models for railway timetable optimization:
Applicability and applications in practice”,
Journal of Rail Transport Planning & Management (2016), 1–28
- [Dijkstra] E.W. Dijkstra,
„A note on two problems in connexion with graphs”,
Numerische Math., 1, 1959, 269–271.
- [Floyd] R.W. Floyd,
„Algorithm 97, Shortest Path”,
Communications of the Association of Computing Machinery, 5, 1962, 345.
- [Großmann et al.] Peter Großmann, Steffen Hölldobler, Norbert Manthey,
Karl Nachtigall, Jens Opitz, Peter Steinke,
„Solving periodic event scheduling problems with SAT”,
TU Dresden, NAI 7345, 166–175, 2012.
- [Liebchen, Peeters] Christian Liebchen & Leon Peeters,
„Integral cycle bases for cyclic timetabling”,
TU Berlin & IMC Zürich, Discrete Optimization, 6(1), 98–109, 2009.
- [Odijk et al.] Michiel A. Odijk, Thomas Breugem, Twan Dollevoet, Gábor Maróti,
„A Constraint Generation Algorithm for
the construction of periodic railway timetables”,
TU Delft, November 1995.
- [Polinder et al.] Gert-Jaap Polinder, Thomas Breugem, Twan Dollevoet, Gábor Maróti,
„An adjustable robust optimization approach for periodic timetabling”,
Erasmus Universiteit Rotterdam & VU Amsterdam, Augustus 2019.

- [Sman] Peter van der Sman,
„Het effect van vertragingen voor treinreizigers”,
Master’s Thesis, Universiteit Leiden, Februari 1995.
- [Serafini, Ukovich] Paolo Serafini & Walter Ukovich,
„A mathematical model for periodic scheduling problems”,
University of Udine & University of Trieste,
SIAM J. Disc. Math. 2, 550–581, 1989.
- [Solinen, Palmqvist] Emma Solinen & Carl-William Palmqvist,
„Development of new railway timetabling rules for increased robustness”,
Linköpings Universitet & Lund Universitet, Zweden, Februari 2023.
- [Zwaneveld] P.J. Zwaneveld,
„Railway Planning: Routing of Trains and Allocation of Passenger Lines”,
Proefschrift aan Erasmus Universiteit Rotterdam, Februari 1997.