

Microscopische simulatie van dienstregelingen in treinstations

Steven Gijsenbergh, KU Leuven, 2013

1. Introductie

De laatste jaren zijn de grote vertragingen en de daaraan gelinkte problemen binnen het vervoer van reizigers via het spoor een hot topic geworden in verschillende media. De vertragingen zijn een grote bron van ergernis voor het grote aantal mensen dat elke dag van en naar het werk pendelt. Dit alles maakt dit thema bijzonder actueel binnen onze hedendaagse samenleving. Het doel bij pogingen om de dienstregeling aan te passen, is om beter om te gaan met de steeds groter wordende stroom van mensen die de trein gebruikt en om de vertragingen te beperken. Het is echter niet omdat een regeling goed werkt onder deterministische omstandigheden dat dit ook het geval is onder stochastische omstandigheden. Deterministische omstandigheden zijn omstandigheden zonder variatie op het tijdstip waarop treinen vertrekken, aankomen en zo meer. Hier tegenover staan stochastische omstandigheden, waar dit wel het geval is.

In deze masterproef wordt een poging ondernomen om een dienstregeling te onderwerpen aan meer stochastische omstandigheden, en om daarbij te evalueren of deze dienstregeling op conflictpunten, die gepaard gaan met deze stochastische omstandigheden, kan verbeterd worden. Hiervoor wordt een programma geschreven in MATLAB R2011b dat in staat is een dienstregeling te simuleren voor een station onder verschillende omstandigheden.

Eerst wordt een blik geworpen op de bestaande literatuur over dit onderwerp, als startpunt voor het schrijven van het programma. De literatuurstudie is terug te vinden in het tweede hoofdstuk van deze masterproef, waarin voornamelijk onderwerpen zoals discrete event simulatie, max-plus algebra, dienstregelingen voor spoorwegverkeer en de beschikbare software besproken worden. In een volgend hoofdstuk wordt het geschreven programma geïntroduceerd en wordt de lezer door de verschillende stappen van het programma geleid. Deze stappen zijn de input, de verwerking en ten slotte de output. In het daaropvolgende hoofdstuk wordt geïllustreerd hoe het programma kan werken in een concrete context. Daarbij wordt uitgegaan van het stationsgebied van Leuven, waarbij de simulatietool gebruikt wordt op enkele voorbeelden. Verschillende dienstregelingen worden hierbij gesimuleerd onder de gemaakte assumpties zodat de resultaten vergeleken kunnen worden. Om af te sluiten worden de conclusies van deze masterproef nog even kort samengevat.

2. Literatuurstudie

In het eerste deel van deze masterproef wordt een literatuurstudie uitgevoerd om na te gaan wat de ontwikkelingen zijn op verschillende domeinen die relevant zijn voor het besproken onderwerp.

2.1 Discrete event simulatie

2.1.1 Discrete gebeurtenissen en synchrone simulatie

Het begrip simulatie is een breed concept dat een brede waaier aan technieken dekt, die telkens volgens een verschillende methodologie één en hetzelfde doel voor ogen houden. Het gemeenschappelijke aan al deze technieken is dat de tijd wordt opgedeeld in kleinere tijdstappen. Met andere woorden, de tijd moet gediscretiseerd worden. Het is exact hierin dat de naam “discrete event simulatie” zijn oorsprong vindt. Dit in tegenstelling tot ‘continue simulatie’ waar dergelijke discretisatie niet plaatsvindt. Het maken van die tijdsprongen zorgt ervoor dat het hele simulatieproces een stuk efficiënter kan verlopen. Er wordt immers enkel nog rekening gehouden met die momenten waarop een specifieke verandering optreedt, die niet zomaar geëxtrapoleerd kan worden. Voorbeelden van dergelijke veranderingen zijn het starten of stoppen van een trein.

Volgens [1] kunnen simulatietechnieken ruwweg opgedeeld worden op basis van drie karakteristieken: de schaal, de analytische benadering en de verwerking. De schaal (macroscopisch of microscopisch) verandert de kern van de simulatie niet, maar bepaalt enkel de mate van detail waarmee het systeem de realiteit probeert na te bootsen. De analytische aanpak kan deterministisch of stochastisch zijn en de verwerking kan synchroon of asynchroon verlopen.

2.1.2 Simulatie

Simulatie kan een handige tool zijn wanneer veldtests onmogelijk of erg duur zijn. Daarom gebruiken veel bedrijven het om op een kostenefficiënte manier de juiste investeringsbeslissingen te maken. Enkele voordelen van simulatie zijn opgesomd in [1]. Zo wordt daarin onder meer gewezen op de mogelijkheden die simulatie biedt, zoals de analyse van de prestaties van een systeem, en op de vrijheid die er binnen de simulatie bestaat om te experimenteren met een gegeven model. Daarbij kunnen onvoorziene omstandigheden gedetecteerd worden en kan er vervolgens geanticipeerd worden vooraleer deze situaties zich in praktijk zouden voordoen.

2.2 Max-plus algebra

Een andere methode voor het analyseren van dienstregelingen, naast simulatie, is het gebruik van max-plus algebra in samenhang met enkele efficiënte graaf algoritmen. De uitleg hierover is gebaseerd op [3]. Max-plus algebra laat toe om stabiliteitsanalyses uit te voeren op grote netwerken. Hierbij kan stabiliteit op twee manieren bekeken worden: lokaal of globaal. Lokale stabiliteit enerzijds doet zich voor binnen een bepaald deel van het volledige netwerk. In dat deelnetwerk komen

treinen toe, waarna ze ook weer vertrekken. Lokale stabiliteit houdt in dat de som van de vertragingen waarmee de treinen uit dit netwerk vertrekken of stoppen kleiner is dan de som van de vertragingen waarmee ze het netwerk betreden. Globale stabiliteit of netwerkstabiliteit anderzijds, wordt bekeken over het ganse netwerk. Dezelfde redenering als bij lokale stabiliteit wordt toegepast, waardoor een netwerk globaal stabiel genoemd kan worden wanneer de initiële vertragingen geëlimineerd kunnen worden binnen een eindige tijdsspanne.

2.3 Dienstregelingen voor spoorverkeer

2.3.1 Het opstellen van dienstregelingen

In de literatuur zijn diverse methodes te vinden voor het opstellen van dienstregelingen voor het spoorverkeer. Binnen al deze verschillende methodes kunnen de grootste verschillen gevonden worden op het vlak van enkele eigenschappen, zoals het al dan niet herhalen van een tabel na een bepaalde periode, het doel van de methode en het aantal beperkingen dat wordt opgelegd.

Als eerste wordt het al dan niet herhalen van een tabel besproken, waarbij [4] een overzicht geeft van de basiswiskunde die schuilgaat achter het opstellen van dienstregelingen. Als een dienstregeling zich herhaalt na een zekere tijd, wordt ze periodiek genoemd. Als dit niet het geval is, wordt niet langer van periodieke planning maar van project planning gesproken. Het grote verschil is de complexiteit. Zoals in [5] te lezen is, is een project planningsprobleem op te lossen in polynomiale tijd terwijl een periodiek planningsprobleem een NP-compleet probleem is.

Daarnaast heeft elke methode steeds een bepaald doel voor ogen, namelijk het optimaliseren van een bepaalde doelfunctie. Dit dekt een brede lading die vaak onderverdeeld wordt in drie klassen: uitvoerbare regelingen, kwaliteitsmaximalisatie en kostminimalisatie. Terwijl in de eerste klasse enkel gestreefd wordt naar het verkrijgen van een uitvoerbare dienstregeling die voldoet aan alle beperkingen, worden in de andere klassen ook expliciet optimalisaties doorgevoerd. Kwaliteitsmaximalisatie bekijkt deze optimalisatie eerder vanuit het standpunt van de reiziger waarbij geprobeerd wordt deze een zo goed mogelijke service te bieden. Hiertegenover staat de kostminimalisatie waarbij vooral de operationele kosten in aanmerking worden genomen en dus meer het standpunt van de aanbieders van treinvervoer wordt ingenomen.

2.3.2 Het nut van simulatie voor dienstregelingen

Bij het opstellen van dienstregelingen wordt veelal uitgegaan van een deterministische wereld. Dit is een wereld waarin alles perfect verloopt zonder enige verstoring of variatie. De realiteit is evenwel vaak anders en bevat deze verstoringen en variaties wel, waardoor ze een meer stochastisch karakter heeft. Een dienstregeling enkel onderwerpen aan deterministische tests kan dus gevaarlijk zijn als men de volledige prestaties en robuustheid van een dienstregeling in kaart wil brengen. Simulatie biedt hierbij een oplossing door de mogelijkheid te bieden om de stochasticiteit in rekening te brengen en om op deze manier ook evaluaties uit te voeren. Bijkomende voordelen, zoals vermeld in [1], zijn dat deze evaluatie kan

gebeuren onder verschillende omstandigheden, zoals wijzigingen aan de infrastructuur of de dienstregeling. Bovendien kan er op die manier ook veel informatie verkregen worden voor latere analyses van probleempunten.

2.3.3 De evaluatie van dienstregelingen

In de context van de evaluatie van dienstregelingen, kan het doel van een simulatiemodel bestaan uit het voorspellen van de verdeling van de vertragingen van de verschillende treinen binnen de dienstregeling, naar analogie van wat te lezen staat in [2]. Dit laat toe om samen met de gemiddelde waarden en de betrouwbaarheidsintervallen de robuustheid van alternatieve regelingen te vergelijken.

De uiteindelijke vertraging die in de dienstregeling voorkomt, zal steeds een functie zijn van de vertraging die oorspronkelijk in het systeem geïntroduceerd werd. Deze geïntroduceerde vertraging wordt ook de primaire vertraging genoemd. De hieruit voortvloeiende vertraging, veroorzaakt door conflicten tussen treinen, wordt bestempeld als secundaire vertraging. De definitie van primaire vertragingen maakt meteen duidelijk dat deze niet vermeden kunnen worden door het aanpassen van de dienstregeling. De secundaire vertragingen kunnen daarentegen wel aangepakt worden. Secundaire vertragingen kunnen op zich vervolgens ook weer de oorzaak zijn van nieuwe secundaire vertragingen, wat een soort sneeuwbaaleffect tot gevolg kan hebben.

Andere evaluatiemaatstaven die frequent gebruikt worden, naast de verdeling van de vertragingen, omvatten de gemiddelde laattijdigheid per trein, de gemiddelde laattijdigheid per vertraagde trein, de gemiddelde bijkomende laattijdigheid per trein, het aantal treinen dat te laat toekomt, het percentage van treinen die te laat toekomen, de stiptheid van treinen of ten slotte de propagatie van vertragingen tussen bepaalde treinen.

3. Methodologie

Het MATLAB R2011b programma van deze masterproef bestaat uit drie grote delen: de input, de verwerking en de output. Het dient vermeld te worden dat het programma bedoeld is voor simulaties in één stationsomgeving, eerder dan een netwerk van stations.

3.1 Input

De input van het programma bestaat uit twee delen. Enerzijds is er de data die wordt ingeladen uit Excel-bestanden. Dit betreft data over de treinen en de infrastructuur. Denk maar aan de dienstregeling, de lengte van treinen, de maximale snelheden van treinen, de toegelaten snelheden op sporen en zo meer. Anderzijds zijn er de instellingen van het programma zelf, die bepalen onder welke omstandigheden die ingegeven dienstregeling gesimuleerd wordt. Typische parameters die hier meegegeven kunnen worden zijn de lengte van de simulatie en de mate van variabiliteit op de starttijden en de wachttijden aan het perron. De inputfase zal in

zijn geheel voor een groot stuk bepalen welke de resultaten van de simulatie zullen zijn.

3.2 Verwerking

De kern van de simulatie bevindt zich op dit punt, namelijk de verwerking. Hierbij worden de inputs uit de Excel bestanden ingeladen. Het resultaat van deze stap wordt achteraf in de output sectie besproken.

Het belangrijkste onderdeel van deze stap is de *Event_Queue*. Deze wachtrij houdt alle gebeurtenissen bij die moeten gebeuren en op welke tijdstippen ze dienen te gebeuren. Het programma neemt dan telkens de eerstvolgende gebeurtenis en probeert deze uit te voeren. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen twee types van gebeurtenissen: het proberen propageren van een trein en het vrijmaken van links. Ook de positie van een bepaalde trein in het netwerk beïnvloedt de acties die dienen ondernomen te worden, en welke beslissingen gemaakt moeten worden tijdens de uitvoering van het programma. Bij elke actie wordt informatie verzameld, onder meer over de positie van de trein en de vertraging ervan. Al de verzamelde data wordt vervolgens in de output stap verwerkt tot bruikbare informatie.

De assumpties en vereenvoudigingen die aanwezig zijn in het model, en van toepassing zijn in deze stap, moeten zeker in acht genomen worden bij de latere interpretatie van de resultaten van de simulatie.

3.3 Output

Het grootste deel van de output wordt pas na de simulatie gegeven. Een klein deel wordt echter ook al tijdens de simulatie vrijgegeven, zodat gewaakt kan worden over de goede voortgang.

De outputs die gegeven worden na de simulatie omvatten meer verwerkte data. Het gaat hier over het voorstellen van de treinen in tijd en ruimte, de bezetting van de verschillende links, de vertragingen bij aankomst en vertrek en output statistieken in tekstvorm. Ook zijn er enkele extra hulpmiddelen voorzien die het eenvoudiger moeten maken om inzicht te krijgen in knelpunten of om verbeteringsrichtingen te vinden. Deze tools voorzien in middelen zoals een *selected link analyse*, het uitzetten van de paden van bepaalde treinen op het netwerk, de bezettingen van de links weergeven op het netwerk en de vertrek en/of aankomstrijden van gekozen treinen op een klok weergeven.

4. Toepassing op het stationsgebied van Leuven

In dit hoofdstuk wordt het eerder aangehaalde programma toegepast op de concrete stationsomgeving van Leuven. De start hiervoor is een functionerende dienstregeling die gebaseerd is op reële data. Dit houdt in dat deze regeling conflictvrij is als ze onder deterministische omstandigheden gesimuleerd wordt. In een eerste deel van dit hoofdstuk wordt een manier getoond waarop de output van het programma kan gebruikt worden om verbeteringen aan te brengen in de dienstregeling zelf. Een tweede deel illustreert vervolgens dat ook aanpassingen in routes geëvalueerd

kunnen worden. In een laatste deel wordt een vaste vertraging opgelegd aan één trein, waardoor een verslechterde startsituatie zich aanbiedt. Daarbij wordt dan ook onderzocht hoe de impact van de vaste vertraging gematigd kan worden.

Omdat het hier een simulatie betreft die één stationsomgeving simuleert, wordt verondersteld dat wijzigingen in de dienstregeling of aan de routes ook voor andere stationsomgevingen werkbaar zijn. In realiteit is het mogelijk dat dit niet steeds het geval is. Hier dieper op ingaan valt echter buiten het bestek van deze masterproef.

4.1 Het verbeteren van de dienstregeling

In deze eerste sectie wordt onderzocht hoe de uitkomst van de simulatie van een dienstregeling verbeterd kan worden door aanpassingen aan te brengen in de dienstregeling zelf. Als startpunt dient daarbij gezocht te worden naar conflicten die zich kunnen voordoen binnen de gegeven regeling. Daarvoor wordt de normale dienstregeling uitgevoerd met een kleine variatie op de starttijden van de treinen. Dit wil zeggen dat de treinen niet langer exact op het voorziene moment het stationsgebied binnenkomen, maar wel iets te vroeg of te laat. Hieruit blijkt, op basis van de gegeven output van de simulatie, dat er zich problemen kunnen voordoen met treinen die van en naar perron A en B gaan. Verder onderzoek wijst uit dat deze treinen dezelfde infrastructuur gebruiken, zij het in tegengestelde richtingen, en dat zij dit daarenboven nog eens doen op ongeveer hetzelfde tijdstip. Het spreekt voor zich dat dit een slechte combinatie is waaruit vrijwel zeker secundaire vertragingen voortvloeien. In een poging om deze conflictsituatie te vermijden, wordt nagegaan of één van deze treinen een andere plaats kan krijgen in de dienstregeling. Daaraan voorafgaand moet echter eerst worden nagegaan of deze infrastructuur nog gebruikt wordt door andere dan de reeds geïdentificeerde treinen. Alle treinen moeten immers in rekening gebracht worden, zodat de kans op nieuwe conflicten beperkt blijft na het aanpassen van de dienstregeling. De treinen die gebruik maken van een bepaald stuk infrastructuur kunnen gevonden worden door het toepassen van een selected link analyse, waarvoor een gelijknamige outputfunctie geschreven werd. In deze functie kan de gebruiker een linknummer ingeven. Voor deze link geeft de functie weer welke treinen ervan gebruik maken en geeft hun paden doorheen het netwerk visueel weer. De weergave van deze treinen op een klok, kan vervolgens een indicatie geven van het moment waarop ze met elkaar kunnen interfereren. Dit leidt tot de conclusie dat sommige treinen, meer bepaald de reeds geïdentificeerde probleemtrenten, inderdaad dicht bij elkaar staan in de dienstregeling. Er blijkt echter eveneens dat er nog voldoende ruimte is om deze treinen te verschuiven.

Wanneer na deze verschuivingen opnieuw simulaties worden doorgevoerd, blijkt al snel dat de resultaten van de verschuiving gunstig blijken te zijn in deze context, zoals te zien is in Tabel 1. Deze tabel geeft de gemiddelde secundaire vertragingen per dag weer met hun 95%-betrouwbaarheidsinterval. De nieuwe dienstregeling verloopt onder een deterministisch regime nog steeds conflictvrij, en veroorzaakt dus geen secundaire vertragingen. Pas wanneer variaties op de starttijden of wachttijden aan het perron worden aangebracht, zijn de verbeteringen werkelijk merkbaar. Vooral wanneer een variatie op de starttijden aanwezig is, is er een significante daling in de totale secundaire vertragingen merkbaar.

Wanneer enkel een variatie aanwezig is op de wachttijden aan het perron is er daarentegen nauwelijks verschil. Dit was ook te verwachten omdat dit de conflictsituatie niet echt uitlokt. Er kan dan ook besloten worden dat de nieuwe dienstregeling verbeteringen inhoudt ten opzichte van de originele situatie onder de gegeven assumpties van het model. De simulatie toont ook aan dat dienstregelingen die gelijkwaardig zijn onder deterministische omstandigheden, andere uitkomsten geven eens ze in een meer stochastisch kader bekeken worden. De gemaakte analyse kan probleempunten identificeren en daarbij voldoende informatie verschaffen om aan te geven in welke richting gezocht kan worden om verbeteringen te vinden.

Gemiddelde secundaire vertraging (minuten/dag)	Deterministisch	Stdev start 1.5, Stdev wacht 0	Stdev start 0, Stdev wacht 1	Stdev start 1.5, Stdev wacht 1
Normale dienstregeling	0 (+/- 0)	26.41 (+/- 2.4)	0 (+/- 0)	25.21 (+/- 3.3)
Aangepaste dienstregeling §4.1	0 (+/- 0)	13.95 (+/- 3.1)	0.02 (+/- 0)	15.24 (+/- 1.8)

Tabel 1: Gemiddelde secundaire vertraging per dag, normale vs. aangepaste dienstregeling

4.2 Het aanpassen van de routes

Terwijl in de vorige sectie werd geprobeerd de prestaties op te drijven door het aanpassen van de dienstregeling ligt de focus in deze sectie op het aanpassen van de route van een trein zelf, in de hoop ook op die manier betere prestaties teweeg te brengen. De startsituatie hiervoor is de verbeterde dienstregeling vanuit de vorige sectie.

Uit andere output van de simulatie van die dienstregeling in het geval waar de meeste variatie wordt toegepast, blijkt dat er nogal wat secundaire vertraging bestaat tussen twee specifieke treinen. Na het plotten van de paden wordt duidelijk dat deze treinen hetzelfde perron gebruiken. Het gebruik van hetzelfde perron kan aan de basis liggen van de secundaire vertragingen tussen de twee treinen. Door het aanpassen van het perron van één van beide treinen naar een naburig perron, wat dus inhoudt dat de route gewijzigd dient te worden, zou deze belangrijke oorzaak van secundaire vertraging weggenomen kunnen worden. Wederom dient echter nagegaan te worden welke andere treinen al op dit gewijzigde perron toekomen, wat wordt gedaan aan de hand van een selected link analyse. Vervolgens kan nagegaan worden of de aankomst- en vertrektijdstoppen van de treinen niet overlappen met de nieuwe trein die op dat perron zou toekomen. Dit blijkt wel degelijk het geval te zijn waardoor het schema ook enkele aanpassingen nodig heeft.

De resultaten van de uitgevoerde simulaties na het wijzigen van het perron en het schema wijzen erop dat de secundaire vertraging voor de verplaatste trein compleet verdwenen is in het scenario met zowel variatie op de starttijden als op de wachttijden aan het perron.

Meteen komt evenwel een nieuw geval van secundaire vertraging aan het licht, deze keer bij andere treinen. Dit illustreert hoe sequentieel problemen opgespoord kunnen worden die aanvankelijk misschien niet zo duidelijk waren. Ook voor de nieuwe probleemsituatie wordt vervolgens een aanpassing in het schema doorgevoerd, naar analogie met de werkwijze die hierboven al besproken is.

De gezamenlijke aanpassingen in deze sectie zorgen ervoor dat er significante verbeteringen optreden in de prestatie van de dienstregeling, en dan vooral op het vlak van de secundaire vertragingen, ten opzichte van de oorspronkelijke situatie. Dit is geïllustreerd in Tabel 2.

Gemiddelde secundaire vertraging (minuten/dag)	Deterministisch	Stdev start 1.5, Stdev wacht 0	Stdev start 0, Stdev wacht 1	Stdev start 1.5, Stdev wacht 1
Aangepaste dienstregeling §4.1	0 (+/- 0)	13.95 (+/- 3.1)	0.02 (+/- 0)	15.24 (+/- 1.8)
Aangepassing §4.2	0 (+/- 0)	9.79 (+/-2.3)	0 (+/-0)	10.19 (+/-1.3)

Tabel 2: Gemiddelde secundaire vertraging per dag, simulatie §4.1 vs. §4.2

Dit proces van continue verbetering kan nog enige tijd doorgevoerd worden, tot het moment waarop geen duidelijke probleempunten meer identificeerbaar zijn. Hierbij is duidelijk aangetoond dat het programma in staat is om de weg te wijzen naar betere routes, al zullen deze meestal toch gepaard moeten gaan met enige aanpassingen in het schema.

4.3 Aanpassen aan een vaste vertraging

Als laatste illustratie van het programma wordt aangetoond hoe een vaste vertraging voor één trein de dienstregeling kan verstoren. Wanneer een bepaalde trein een vaste vertraging krijgt, blijkt dat de dienstregeling zelfs onder deterministische omstandigheden niet meer conflictvrij kan functioneren, zoals in Tabel 3 te zien is. Een poging tot verbetering wordt gezocht in het omleiden van de vertraagde trein in kwestie, om op die manier de negatieve effecten ervan te matigen.

Eerst komt een analyse aan bod van de punten waar de vertraging precies voor problemen zorgt. Al snel is duidelijk dat er conflicten ontstaan tussen de vertraagde trein en één andere trein, met name door het gebruik van hetzelfde perron. Deze tweede trein blijkt bovendien een Thalys trein te zijn, waarbij er wordt vanuit gegaan dat het veel moeilijker is om deze internationale trein in routing of in de dienstregeling aan te passen, dan een lokale trein. Daar komt nog bovenop dat een Thalys trein een hogesnelheidstrein is, die best op de daarvoor voorziene sporen wordt gehouden. Daaruit volgt dan ook snel het besluit dat de vertraagde trein zelf een andere routing doorheen het netwerk krijgt, en dus niet de Thalys. Zowel het start- en eindpunt als het perron van de vertraagde trein worden veranderd. Daarbij wordt nagegaan welke uiterste punten in het netwerk de trein even goed van zijn oorsprong of naar zijn bestemming kunnen brengen, waarna deze punten vastgelegd worden. Ook wordt rekening gehouden met de richtingen van de andere treinen die deze toegang of uitgang van het netwerk gebruiken. Voor de toewijzing aan een nieuw perron wordt vervolgens gekeken welke perrons zowel in tijd als ruimte beschikbaar zijn. Hoewel het nieuw gekozen perron in kwestie al gebruikt wordt door een andere trein, die in de andere richting toekomt, zou dit geen probleem mogen vormen voor deze (tijdelijke) oplossing. Beide treinen zijn immers in de tijd ver genoeg gespreid van elkaar.

Bovenstaande aanpassingen zorgen ervoor dat onder deterministische omstandigheden opnieuw een conflictvrije werking gewaarborgd kan worden

wanneer de vaste vertraging van de trein in achtning wordt genomen, zoals in Tabel 3 te zien is.

Gemiddelde secundaire vertraging (minuten/dag)	Normale dienstregeling	Vaste vertraging	Rerouting
Normale dienstregeling	0 (+/- 0)	37.7 minutes (+/- 0)	0 (+/- 0)

Tabel 3: Gemiddelde secundaire vertraging per dag, vaste vertraging en rerouting

De vraag kan nog gesteld worden of de aanpassing van de route van de probleemtrein ook in een normale situatie, waar de vaste vertraging niet optreedt een verbetering zou bieden. Hiertoe worden opnieuw verschillende scenario's gesimuleerd met verschillende instellingen voor de variabiliteit. Hierbij blijkt evenwel dat geen van beide scenario's significant beter of slechter presteert.

4.4 Andere mogelijke toepassingen van het programma

De analyses uit vorige secties tonen slechts enkele mogelijkheden van het programma. De output kan ook dienst doen om inzicht te krijgen in andere situaties om deze te proberen verbeteren. Deze sectie belicht enkele andere situaties waarvoor het programma kan aangewend worden. Hoewel de uitgebreide bespreking van deze situaties buiten het bestek van deze masterproef valt, kan een korte toelichting misschien inspiratie bieden voor toekomstig werk.

In het huidige model wordt de minimale wachttijd aan de perrons bepaald op één minuut. Deze parameter kan echter gewijzigd worden om de impact daarvan na te gaan. Verwacht wordt dat minder treinen op tijd zullen kunnen vertrekken onder stochastische omstandigheden.

Sommige treinen kunnen baat ondervinden van het wijzigen van de gebruikte sporen. Bijvoorbeeld een IC trein die op een trager spoor rijdt dan een IR trein. De gevolgen van het omwisselen van deze paden, als dit zou mogelijk zijn, kunnen onderzocht worden.

Hetzelfde geldt voor het toevoegen van een nieuwe trein. De output kan hierbij een gids zijn die aantoont welke sporen en perrons nog de nodige capaciteit bieden voor een extra trein. Voor de perrons kan ook bekeken worden welke tijdspannes nog beschikbaar zijn om een extra trein te laten toekomen.

Doorheen dit ganse werk werd ook aangenomen dat de variabiliteit van de starttijden en wachttijden aan het perron een normale verdeling volgen. Deze verdeling kan eenvoudig gewijzigd worden.

Andere dienstregelingen of netwerken kunnen ook als input dienen voor analyses.

5. Conclusie

Dit werk begon met het uitvoeren van een literatuurstudie. De bestudeerde onderwerpen omvatten discrete event simulatie, max-plus algebra, dienstregelingen voor spoorwegverkeer en een overzicht van de beschikbare software. De grootste lessen die hieruit getrokken kunnen worden, zijn de voordelen die samenhangen met het gebruik van simulatie, zoals de lage kost waarmee simulatie ingezet kan worden

om het effect van een verscheidenheid aan omstandigheden na te gaan op de robuustheid van een dienstregeling.

Het volgende hoofdstuk leidt door de verschillende stadia van het geschreven programma. Zowel de input, de verwerking als de output kwam aan bod.

Hoofdstuk 4 toont hoe het programma gebruikt kan worden in een concrete dienstregeling, en hoe het probleempunten kan helpen identificeren en op verscheidene manieren aanpakken. Zowel de dienstregeling, de route of beide worden hierbij aangepast. De resultaten wijzen hierbij in het algemeen op een verbetering van de prestaties onder de assumpties en beperkingen van het model. De meest gemeten verbetering betreft de secundaire vertragingen, wat meteen ook aanzien wordt als een zeer belangrijke statistiek. Deze secundaire vertraging geeft immers weer hoe robuust de dienstregeling is en kan ook bepalen hoe hoog de operationele kosten oplopen in realiteit.

Uit het voorgaande onderzoek blijkt duidelijk dat het werk van deze masterproef kan dienen als een startpunt voor verder onderzoek. Als meer data beschikbaar wordt gesteld, bijvoorbeeld over de verdelingen van vertragingen en eigenschappen van de infrastructuur en treinstellen, is het mogelijk het systeem beter te kalibreren. Dit vergroot de waarde van de geleverde output.

In het algemeen geldt evenwel dat dit programma noodzakelijkerwijze gebaseerd is op enkele assumpties om de realiteit te vereenvoudigen en daarin vaak ook zijn beperkingen kent. Een voorbeeld hiervan is het feit dat de treinen worden verondersteld zich aan constante snelheden te verplaatsen, geen rekening houdend met versnellen en vertragen. Deze assumpties zijn gebaseerd op de afweging die steeds gemaakt moet worden tussen de potentiële meerwaarde van het toevoegen van dergelijke complexe eigenschappen enerzijds en de rekentijd die ermee gepaard gaat anderzijds. Natuurlijk moet de output steeds geïnterpreteerd worden in het licht van de gemaakte assumpties, maar staat het de gebruiker wel vrij de mogelijkheden nog uit te breiden indien dit gewenst is.

Verder werk kan uitgaan naar het uitbreiden van het programma met meer realistische eigenschappen en variabelen, of het gebruiken van het huidige programma voor het analyseren van en hopelijk verbeteren van realistische situaties. Ook een uitbreiding naar het in rekening brengen van meerdere stationsomgevingen kan duidelijker maken of de doorgevoerde wijzigingen globaal gezien ook voordelen opleveren.

References

- [1] I.A. Hansen and J. Pachl, Railway timetable and traffic. Analysis - modelling - simulation. Eurailpress, 2008, no. ISBN: 978-3-7771-0371-6
- [2] M. Carey and S. Carville, Testing schedule performance and reliability for trains stations, The journal of the operational research society, vol. 51, No. 6 (Jun., 2000), p.666-682.
- [3] R. Goverde, Railway timetable stability analysis using max-plus system theory, Elsevier, Transportation research part B, p. 179-201, 2005.
- [4] L. Schrijver, Wiskunde achter het spoorboekje, Centrum voor wiskunde en informatica en universiteit Amsterdam.
- [5] P. Serafini and W. Ukovich, A mathematical model for periodic scheduling problems, Society for industrial and applied mathematics, vol. 2, No. 4, p. 550-581, November 1989.