

# Optimal timetables for temporarily unavailable tracks

Optimale dienstregelingen voor tijdelijke, gedeeltelijke blokkades van het spoor

Sander Van Aken

*Samenvatting thesis voor TML Thesisprijs 2017*

Master in de ingenieurswetenschappen:  
verkeer, logistiek en intelligente transportsystemen

**Promotor:**  
Prof. dr. ir. Pieter Vansteenwegen

**Begeleider:**  
Sofie Van Thielen

Academiejaar 2016- 2017

# 1 Inleiding

Efficiënt en performant spoorvervoer wordt gezien als een van de belangrijkste maatregelen in het terugdringen van de toenemende filedrukke. Het plannen van spoorvervoer bestaat uit een opeenvolging van verschillende planningsstappen, waaronder het selecteren van de verschillende lijnen en het uitwerken van een dienstregeling. Hoe goed een dienstregeling ook is, er kunnen altijd vertragingen ontstaan door externe factoren. Dit kan ertoe leiden dat het originele plan niet meer uitgevoerd kan worden. Passagiers verwachten echter een hoogstaande service in alle omstandigheden, ook in geval van grote storingen op het netwerk.

Binnen de beheersovereenkomst met de overheid, dienen NMBS en Infrabel een zeker stiptheidsniveau te behalen. Over het volledige jaar 2015 bedroeg de punctualiteit volgens Infrabel 89,3%. 22.947 treinritten, ofwel 1,9% van het totale aantal, werden afgeschaft. In 2016 waren beide cijfers opnieuw in dalende lijn. Men kan stellen dat deze prestaties nog sterk kunnen verbeteren, zeker ook tijdens grote verstoringen. Men schat dat er gemiddeld één storing per dag plaatsvindt. In meer dan de helft van de gevallen ligt de oorzaak niet bij NMBS of Infrabel, maar hun dispatchers dienen toch een zo goed mogelijke service te voorzien. Momenteel hebben ze hierbij, naast conflictdetectie, geen enkele vorm van (kwantitatieve) beslissingsondersteuning ter beschikking: dispatchers nemen beslissingen over het herplannen en afschaffen van treinen vooral op basis van ervaring. Hiervoor bestaan ook geen voorgedefinieerde plannen of richtlijnen, ondersteund door het idee dat “elke storing uniek is”. Er bestaat geen twijfel dat storingen sterk variëren in tijd en ruimte. Men kan zich echter afvragen of het effect op de dienstregeling, en de te nemen maatregelen, daarom ook in elke situatie sterk verschillend zijn.

Zo kunnen deze sterk gelijkend zijn tijdens het stilvallen van een trein op een dubbelsporig segment tussen twee grote stations, zoals bijvoorbeeld tussen Tienen en Landen of op een, qua infrastructuur, gelijkaardige locatie op het netwerk. De andere treinen dienen dan tijdelijk over het overblijvende spoor te worden geleid. Deze veelvoorkomende stukjes infrastructuur worden in de thesis *archetypische infrastructuurelementen* (AIP's) genoemd.

Het doel van de thesis is om wiskundige modellen te ontwikkelen om dispatchers te ondersteunen tijdens storingen die leiden tot capaciteitsreductie op drie van deze AIP's. Na het ingeven van een beperkt aantal parameters die de verstoring karakteriseren, dient de dispatcher snel een suggestie te krijgen over hoe de situatie het best wordt aangepakt. De modellen beschouwen enkel het aanpassen van de dienstregeling op het segment tussen twee grote stations. Effecten op het verkeer buiten deze corridors, alsook op materieel en personeel, worden niet mee in rekening genomen. Dit gebeurt in de veronderstelling dat het verkleinen van de impact op de corridor, ook de impact buiten de corridor vermindert.

## 2 Literatuurstudie

Dit gedeelte van de thesis beschrijft enerzijds de wetenschappelijke literatuur en anderzijds de praktijk ter zake in verschillende landen. Dat laat toe om duidelijk aan te geven wat de aanpak in deze thesis uniek maakt.

De huidige wetenschappelijke literatuur beschrijft een groot aantal modellen en methodes voor het zo goed mogelijk afhandelen van het treinverkeer in geval van kleine vertragingen. In deze situaties volstaat het vaak om treinen te herplannen, van volgorde te wisselen, of ze binnen het station een andere route toe te kennen. Afschaffingen zijn meestal niet nodig en de impact op materieelcirculatie en personeelsplanning is beperkt of onbestaande. Tijdens grote verstoringen, zoals een tijdelijke blokkade van een spoor, dient men grotere maatregelen te nemen, vaak wordt dit (*railway disruption management*) genoemd.

De literatuur over *disruption management* is beperkter, hoewel er de laatste jaren meer en meer modellen ontwikkeld worden. De verschillende bijdragen kunnen onderscheiden worden op vlak van het type verstoring (bijv. volledige versus partiële blokkade), de maatregelen die beschouwd worden (zoals herplannen en afschaffen), de methodologie (zoals heuristieken of lineaire optimalisatie), de tijdsduur van de verstoring, en het planningsniveau (zoals dienstregeling en/of materieelcirculatie). Optimalisatiemodellen slagen er vaak in goede resultaten te genereren, maar ontberen het in computationele efficiëntie: rekestijden zijn te lang om in real-time te gebruiken. Het AIP-concept dat wij voorstellen, werd nog niet eerder onderzocht.

In verschillende landen hebben dispatchers voorgedefinieerde plannen ter beschikking: voor een bepaald type verstoring op een zekere locatie worden de te nemen maatregelen geschetst. Het detailniveau verschilt van situatie tot situatie. In Nederland heeft men bijvoorbeeld een duizendtal verschillende plannen, die voorschrijven welke treinen er dienen te worden afgeschaft in een specifieke situatie. Gelijkaardige plannen bestaan in Duitsland, Japan, en voor het stedelijk netwerk van Kopenhagen. Men erkent - zowel in de praktijk als in de wetenschappelijke literatuur - dat deze plannen een goede basis vormen voor communicatie tussen verschillende actoren en zo de tijd voor het opstellen van een plan verkorten. Daarentegen zijn ze niet flexibel en worden ze opgesteld op basis van de ervaring van dispatchers.

Wanneer er een verstoring plaatsvindt op het Belgische netwerk, overleggen vertegenwoordigers van Infrabel en NMBS in het *Railway Operations Centre* (ROC). Dit orgaan staat in contact met de 31 lokale seinhuizen en zorgt voor de coördinatie op netwerkniveau. Nadat men tot een overeenkomst komt op het ROC, worden de beslissingen gecommuniceerd naar de lokale dispatchers. Dispatchers worden ondersteund door Infrabels Traffic Management System (TMS), dat een conflict tussen twee treinen 15 min voor het plaatsvindt, detecteert. Ze hebben echter geen (kwantitatieve) evaluatie van het effect van een maatregel op de rest van het treinverkeer.

Beslissingen zijn dan ook gebaseerd op de ervaring van dispatchers en hun kennis over aspecten als dienstregeling en passagiersstromen.

### 3 Methodologie

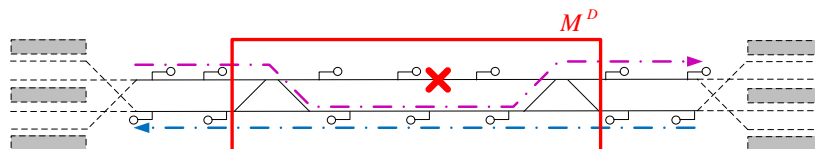
Hoofdstuk 3 van de thesis legt de gebruikte methodologie uit, die wordt gemotiveerd en op punt gesteld. In de volgende hoofdstukken wordt de methodologie dan toegepast en worden de specifieke resultaten besproken.

Figuur 1 toont het eerste AIP. Dit bestaat uit een dubbelsporige lijn tussen twee stations of knooppunten, waartussen er twee dubbele wissels aanwezig zijn. Tijdens een verstoring die een van beide sporen tussen de wissels onbeschikbaar maakt, zoals een defecte trein, dienen treinen in beide richtingen op het overgebleven spoor te worden gepland. Een dispatcher zal dan moeten beslissen in welke volgorde de treinen over het enkelsporige segment worden gestuurd, en welke er dienen te worden afgeschaft. Het doel is om de impact op de passagiers zo klein mogelijk te houden. Deze situatie wordt gebruikt om het eerste model te ontwikkelen. De modellen voor een tweede en derde AIP bouwen verder op dit basismodel.

Op basis van de beschreven situatie, worden in de thesis de belangrijkste beïnvloedende parameters geïdentificeerd. Deze zijn gerelateerd aan aspecten als de trein zelf (bv. maximale snelheid), de infrastructuur (bv. lengte van het enkelsporige segment en seinafstanden), de dienstregeling, geschatte passagiersaantallen, en de verstoring (bv. maximale toegestane snelheid en verwachte duur).

Door de grote hoeveelheid aan mogelijke combinaties van maatregelen, blijkt een aanpak door simulatie van verschillende scenario's geen optie. De dispatcher zou op die manier geen indicatie krijgen welke maatregel het resultaat van een bepaald scenario zou kunnen verbeteren. Het doorrekenen van alle scenario's kost dan ook te veel tijd. Daarom wordt er gekozen een optimalisatiemodel te ontwikkelen.

In de veronderstelling dat er in de aangrenzende stations, of op de dubbelsporige segmenten, een onbeperkte capaciteit is om treinen te laten wachten, kan het probleem wordt geïnterpreteerd als een één-machine (planning)probleem. Treinen, oftewel jobs, dienen te worden gepland op het enkelsporige segment, ofwel de machine ( $M^D$  in Figuur 1). Hierbij hebben ze een bepaalde rijtijd (procestijd) en geldt er een minimale opvolgtijd tussen



Figuur 1: Schematische voorstelling van het eerste AIP.

twee treinen, die kan worden vertaald naar een volgorde-afhankelijke omsteltijd. Het oplossen van het probleem komt dan neer op het bepalen van de volgorde tussen de jobs en het eventueel afwijzen van jobs op zo'n manier dat de impact op passagiers wordt geminimaliseerd. De aankomst- en vertrektijden worden hierdoor impliciet vastgelegd. Opvolgtijden zijn gebaseerd op bloktijdtheorie, waardoor er een conflictvrije dienstregeling ontstaat.

Voor elk van de drie AIP's wordt er een praktische case study gebruikt, waarvoor de input wordt verzameld uit verschillende bronnen. Het doel is tweeledig. Ten eerste, tonen hoe, en dat, de modellen in de praktijk zouden kunnen worden gebruikt. Ten tweede kunnen er op basis van de resultaten servicebeperkingen worden gedefinieerd die tot betere resultaten kunnen leiden in reële situaties. Naast deze praktische toepassing wordt elk model onderworpen aan een theoretische analyse op een artificiële case study. Hiermee wordt de impact van variaties in de verschillende parameters geanalyseerd. Het doel: bepalen welke maatregelen een goed resultaat kunnen opleveren in verschillende situaties en hieruit "regels" afleiden.

aan een theoretische analyse op een artificiële case study.

Helaas houdt Infrabel beslissingen die dispatchers tijdens een bepaalde verstoring nemen, niet structureel bij. Onder andere daardoor is het niet mogelijk de resultaten van de modellen rechtstreeks te vergelijken met de huidige praktijk. Daartoe worden er twee heuristieken ontwikkeld. Deze dienen als referentiepunt voor het evalueren van de effectiviteit van het model ten opzichte van (een benadering van) de huidige aanpak, waarbij dispatchers beslissingen nemen op basis van ervaring. Een eerste heuristiek stelt een onervaren dispatcher voor, die de eerstgeplande trein voorrang geeft, meer algemeen bekend als een FCFS-heuristiek. De tweede heuristiek incorporeert meer probleemspecifieke kennis en laat treinen in batches per richting opereren. Treinen in dezelfde richting kunnen namelijk vaak korter op elkaar volgen. De heuristiek vermijdt daardoor de lange omsteltijd bij het wisselen van richting. Deze (max,wait)-heuristiek vereist twee parameters, waaronder een maximale batchgrootte. Beide heuristieken schaffen een trein af als de vertraging oploopt tot meer dan 1 u.

De optimalisatiemodellen, inclusief de datavoorbereiding en resultaat-analyse, en de heuristieken, worden geïmplementeerd in Matlab<sup>®</sup> R2016a. Het optimalisatiemodel wordt opgelost met CPLEX<sup>®</sup> v12.6, waarbij de YALMIP toolbox als interface tussen beide programma's wordt gebruikt. Uit een rekenkundige analyse blijkt echter dat de rekentijd in bepaalde situaties sterk oploopt. De thesis bespreekt de oorzaken hiervan en mogelijke oplossingsrichtingen. Na finetunen van de zoekstrategie van CPLEX blijkt dat het zoeken naar meerdere haalbare oplossingen gedurende 2 min minstens even goede resultaten oplevert dan het aantonen van optimaliteit van één oplossing gedurende 15 min. Aangezien dispatchers snel een oplossing willen, wordt de zoekstrategie dan ook gewijzigd. De focus ligt op het vinden van (goede) oplossingen in verschillende hoeken van de oplossingsruimte.

## 4 Modelbeschrijving en resultaten

### 4.1 AIP 1: dubbelsporige lijn zonder stops

Door het probleem te beschouwen als een één-machine probleem, bestaat een oplossing voor het eerste AIP eruit om de volgorde tussen treinen vast te leggen, tezamen met een beslissing over het afschaffen van treinen. De impact op passagiers wordt geminimaliseerd door een gewogen doelfunctie van de treinvertragingen en -afschaffingen. Zo legt de volgordebepaling ook meteen de aankomst- en vertrektijden vast: zo vroeg mogelijk, maar rekening houdend met de dienstregeling.

De dispatcher dient slechts vijf parameters in te geven: de lengte van het geaffecteerde dubbelsporige segment, de configuratie van de wissels, het spoor dat niet beschikbaar is, de (potentieel lagere) toegestane snelheid op het overgebleven spoor, en een tijdshorizon waarvoor een oplossing dient te worden bepaald. Deze laatste kan gelijk zijn aan de verwachte duur van de verstoring. De dienstregeling en informatie over de infrastructuur zou in de praktijk automatisch kunnen worden ingeladen uit het TMS.

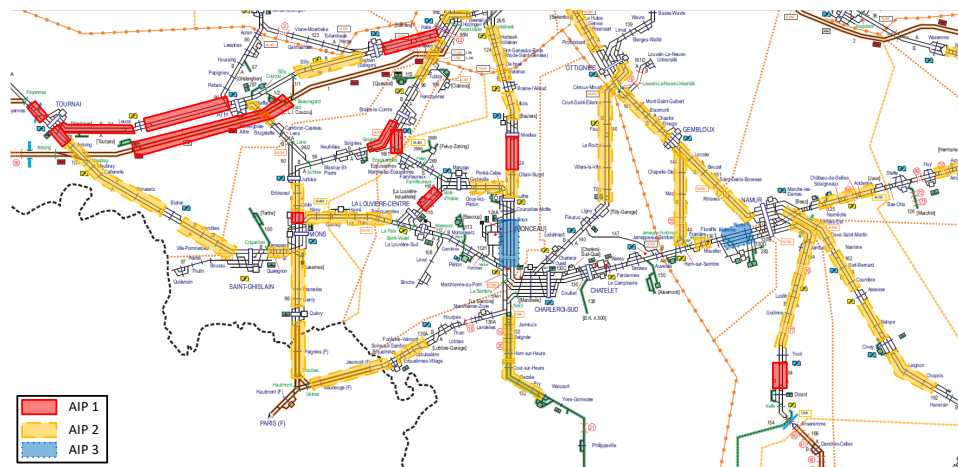
In de praktijk nemen dispatchers echter meer aspecten in rekening. Het probleem beschouwen als een machineplanningsprobleem laat toe om een aantal van deze aspecten te modelleren als bijkomende “servicebeperkingen”. Zo kan men opleggen dat internationale treinen geen vertraging mogen oplopen, en zeker niet mogen worden afgeschaft. Het opleggen van een maximale vertraging kan worden gebruikt om een aansluiting in een volgend station te verzekeren, of te grote impact op de materieelcirculatie vermijden. Passagiersaantallen worden in rekening genomen door aangepaste gewichten in de doelfunctie, welke ook prioriteiten kunnen aangeven. In de thesis worden er verschillende anderen, alsook hun impact op de oplossingen beschreven.

De eerste praktische case study bestaat uit een storing van drie uur tussen Tienen en Landen, tijdens de ochtendspits. Vergelijking van de resultaten van het model met die van de heuristieken, toont dat het model erin slaagt te balanceren tussen de vertraging van alle treinen tezamen. Zo kan het model ervoor kiezen om een trein langer te laten wachten om lange opvolgtijden en dus extra vertraging voor alle daaropvolgende treinen, te vermijden. Daarnaast wordt er optimaal gebruik gemaakt van de buffertijd tussen treinen in de oorspronkelijke dienstregeling. Ten slotte ziet men dat een trein aan het begin van de dienstregeling wordt afgeschaft indien het inplannen ervan meer dan een uur vertraging oplevert voor de daaropvolgende treinen tezamen. Bij de heuristieken loopt de vertraging in de meeste gevallen op naarmate de storing langer duurt. Dit leidt pas tot afschaffingen naar het einde van de tijdshorizon toe.

Ook uit de analyse van scenario’s op een artificiële case study blijkt dat het model lange opvolgtijden tussen tegengestelde richting vermijdt door

treinen aan een kant van de corridor te laten wachten totdat alle treinen wachtend aan de andere kant, gepasseerd zijn, waardoor er dus batches ontstaan. Hierdoor presteert de ontwikkelde (max,wait)-heuristiek veel beter dan de FCFS.

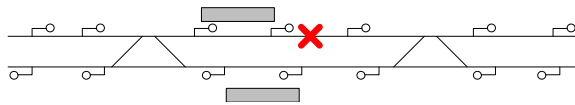
Figuur 2 toont een schematische voorstelling van een groot gedeelte van de Belgische spoorinfrastructuur. Het is duidelijk dat het eerste AIP niet zo vaak voorkomt aangezien er in veel gevallen een stop naast de sporen tussen twee grotere stations ligt. Het tweede AIP bouwt daarom verder op het eerste, maar voegt stops toe aan de dubbelsporige lijn. Lijnen met meer dan twee sporen komen niet vaak voor, maar vormen complexere problemen door het hogere aantal treinen en de toegenomen keuzevrijheid voor de dispatcher. Deze situaties worden behandeld in het derde AIP.



Figuur 2: Toepasbaarheid van de drie AIP-modellen op een gedeelte van het Belgische netwerk. Gebaseerd op <http://www.infrabel.be/en/professionals/rail-operators/network-statement/>.

## 4.2 AIP 2: dubbelsporige lijn mét stops

Figuur 3 toont de basisinfrastructuur voor het tweede AIP, waarbij er minstens één stop langs de corridor ligt. De thesis behandelt ook de complexere situatie waarbij de stop tussen een dubbele wissel ligt. In de meeste gevallen halteren enkel de lokale treinen bij deze stops. Afhankelijk van de frequentie en het aantal passagiers dat hier op- en afstapt, kan het voordelig zijn enkele halteringen af te schaffen. Dit zorgt ervoor dat de rijtijd van die trein en de opvolgtijd met de daaropvolgende trein afnemen. Het model krijgt controleerbare proces- en omsteltijden. De maatregel heeft echter een grote impact op de lokale passagiers. De doelfunctie voor het tweede AIP neemt dan ook een bestraffing voor het overslaan van de stop in rekening. Om het model te gebruiken dienen dispatchers per stop de fractie aan passagiers die



Figuur 3: Schematische voorstelling van het tweede AIP.

op- en afstappen, alsook de locatie van de stops aan te geven, naast de eerder genoemde parameters. Servicebependingen kunnen een minimaal aantal haltingen per richting per uur vereisen.

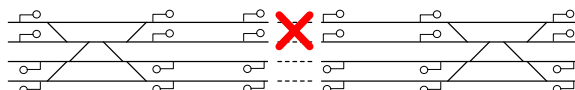
Voor dit AIP wordt er een case study op de lijn tussen Aalter en de aansluiting bij Oostkamp gekozen, tezamen met een artificiële case study. Ten eerste kan men concluderen dat het afschaffen van een haltering weldegelijk tot sterk verbeterde resultaten kan leiden. Welke haltingen er net worden afgeschaft, hangt voornamelijk samen met de buffertijd in de oorspronkelijke dienstregeling. Voor treinen die een stop met een hoge bestraffing hebben, slaagt het model er soms in extra buffertijd in te plannen om te voorkomen dat de vertraging voor daaropvolgende treinen sterk toeneemt. De resultaten van de heuristieken, die net zoals dispatchers haltingen niet afschaffen, blijken een veel hogere impact te hebben op alle passagiers tezamen. Men kan concluderen dat het afschaffen van haltingen een erg subtiele, maar effectieve, maatregel is.

Figuur 2 toont dat dit AIP veel vaker voorkomt op het netwerk dan het eerste AIP. Er wordt geschat dat met dit model grote storingen op ongeveer de helft van de dubbelsporige corridors van het Belgische netwerk kunnen worden aangepakt met dit model.

### 4.3 AIP 3: meersporige lijn met stops

Ten slotte wordt ook de situatie met meer dan twee sporen beschouwd. Figuur 4 toont een schematische voorstelling, waarbij de storing resulteert in twee afgesloten sporen. Er is niet langer sprake van een standaardconfiguratie voor de wissels zoals in het eerste en tweede AIP, en treinen dienen te worden toegewezen aan een van de overblijvende sporen. Het toewijzen van treinen aan de overgebleven sporen wordt verder gecompliceerd door het feit dat treinen overlappende routes kunnen hebben over beide wisselzones.

Conflicterende routes worden automatisch geïdentificeerd op basis van de configuratie van de wisselzones en mogelijke spoortoewijzingen. Deze configuratie bepaalt ook welke spoortoewijzingen mogelijk zijn en welke niet.



Figuur 4: Schematische voorstelling van het derde AIP.



Vervolgens wordt het probleem omgevormd tot een parallel-machine probleem, waarbij de proces- en omsteltijden machineafhankelijk zijn indien de maximaal toegelaten snelheid verschilt per spoor.

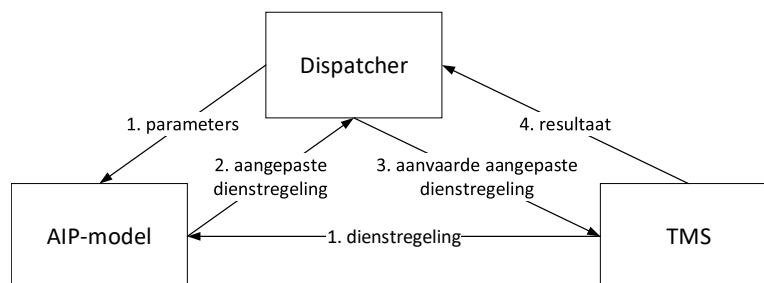
Analyse van de resultaten van het model toont aan dat naarmate er meer sporen zijn afgesloten, de neiging tot het reserveren van de sporen voor treinen in een bepaalde richting, toeneemt. In sommige gevallen blijkt het echter mogelijk om ook treinen in tegenovergestelde richtingen in te passen. In de veronderstelling dat dispatchers niet tegelijkertijd rekening kunnen houden met overlappende routes op beide wisselzones, die enkele kilometers uit elkaar liggen, nemen de heuristische conflicten in die wisselzones niet in rekening. Het model leidt dan ook tot resultaten met meer afschaffingen, maar een hogere graad aan realisme. Met andere woorden, in de praktijk zullen de resultaten van het model beter zijn dan deze van de heuristieken, waarbij er heel wat onverwachte bijkomende vertragingen zullen ontstaan.

Om het model te gebruiken, dienen dispatchers, naast de eerder genoemde parameters, enkel aan te geven welke sporen zijn afgesloten en wat de maximale toegelaten snelheid per spoor is. De configuratie van de wisselzones kan worden afgeleid uit een infrastructuurdatabase bij Infrabel.

## 5 Praktische implementatie

Figuur 5 toont een mogelijk framework om de AIP-modellen te gebruiken door de ideeën beschreven en ontwikkeld in deze thesis, te combineren met bestaande concepten uit de literatuur en de huidige tools binnen Infrabel. In dit framework werken drie componenten samen om een zo goed mogelijke service te leveren tijdens storingen op de beschreven AIP's.

Na het ontstaan van een storing, verzamelt de (lokale) dispatcher informatie over verschillende parameters. Deze worden, tezamen met bijkomende servicebependingen, doorgegeven aan het AIP-model. Vanuit het TMS worden de huidige verkeerssituatie, inclusief vertragingen, en de geplande dienstregeling voor de opgegeven tijdshorizon aan het AIP-model doorgegeven. Na een zekere rekentijd, bijv. 2 min, geeft het model de best



Figuur 5: Framework voor het gebruik van de AIP-modellen binnen Infrabel.

gevonden oplossing terug aan de dispatcher. Indien deze de oplossing aanvaardt, wordt die doorgegeven aan het TMS en worden conflicten buiten de corridor geïdentificeerd. Bijkomende vertragingen elders op het netwerk tijdens de daaropvolgende tijdshorizon kunnen de oplossing in die mate verstoren dat het nodig kan zijn een nieuwe oplossing te bepalen. Dit kan op een automatische manier binnen een rollende horizon-aanpak worden gedaan.

## 6 Conclusie

In deze thesis werd het concept van AIP's geïntroduceerd als een nieuwe manier om grote storingen met capaciteitsreductie op een corridor tussen twee stations te modelleren. Deze aanpak werd nooit eerder beschreven in de wetenschappelijke literatuur en biedt daarmee een innovatieve aanvulling op de bestaande modellen. Daarnaast vormt het een waardevolle aanvulling op de bestaande tools bij Infrabel, die nog geen kwantitatieve evaluatie bieden.

Storingen op drie AIP's werden opgevat als machineplanningsproblemen met de mogelijkheid jobs te negeren. De drie resulterende modellen kunnen toegepast worden op veelvoorkomende situaties van toenemende complexiteit: van een dubbelsporige corridor zonder stops tot meersporige corridors met stops. Maatregelen bestaan uit het vastleggen van de volgorde, het afschaffen van treinen, het overslaan van halteringen en spoortoewijzing. De resultaten van de modellen werden vergeleken met die van heuristische representatief voor een dispatcher zonder beslissingsondersteuning. De analyse toonde aan dat de modellen erin slagen op een effectieve manier te balanceren tussen de verschillende maatregelen door de effecten ervan op de vertraging voor alle daaropvolgende treinen in rekening te nemen.

Toekomstig onderzoek kan zich richten op de interactie met Infrabel's TMS, het opnemen van de AIP-modellen in bestaande iteratieve frameworks die ook de materieelcirculatie en personeelsplanning in rekening brengen, en verdergaan met het identificeren van bijkomende AIP's, potentieel ook binnen stationsgebieden.

Dispatchers kunnen de modellen gebruiken door een beperkt aantal parameters omtrent de storing en de omliggende infrastructuur in te geven. Bijkomende servicebeperkingen kunnen hun kennis over passagiersverwachtingen en aspecten niet gelinkt aan de corridor zelf, in rekening nemen. Zo worden de kennis van dispatcher enerzijds, en de kracht van de modellen om te balanceren tussen verschillende maatregelen anderszijds, gebundeld om de passagierstevredenheid te verbeteren.