

Motivatie en validatie van een nieuwe definitie van robuustheid voor treinsystemen

Sofie Burggraeve

KU Leuven¹

Thijs Dewilde

KU Leuven²

Tim Ameye

KU Leuven³

Peter Sels

Logically Yours BVBA⁴

Pieter Vansteenwegen

KU Leuven⁵

In het laatste decennium zijn er veel studies gewijd aan het optimaliseren en evalueren van treinsystemen en is er veel aandacht besteed aan het bepalen van performantiecriteriën voor deze treinsystemen. Eén van de belangrijkste kwaliteitsmaatstaven is robuustheid, waarvoor echter vele definities in omloop zijn. Wij stellen een duidelijke en allesomvattende definitie op voor de robuustheid van een treinsysteem en dit vanuit het standpunt van de reiziger. Deze definitie focust op de reële reistijd van een reiziger, waarin zowel geplande reistijden, wachttijden en vertragingen zijn ingerekend. Aan de hand van deze reistijden in de praktijk van alle passagiers in een treinsysteem, kan een robuustheidscore toegekend worden aan elke dienstregeling. Dit maakt het gemakkelijk om dienstregelingen voor een zelfde systeem te gaan vergelijken. Aan de hand van twee case studies tonen we aan dat onze definitie zeer geschikt is om in de praktijk te gebruiken als performantiecriterium. Hoewel ook lijnplanning, real-time bijsturen, etcetera, maar ook aansluitingen tussen verschillende vervoerswijzen bepalend zijn voor de reële reistijden van de reizigers, beperken we ons in dit artikel tot de impact van het opstellen van een dienstregeling en dit enkel voor treinsystemen. Met behulp van een optimalisatiealgoritme dat de robuustheid

¹ KU Leuven - Centrum voor Industrieel Beleid / Verkeer en Infrastructuur, Celestijnenlaan 300a, 3001 Heverlee,
E: Sofie.Burggraeve@kuleuven.be

² KU Leuven - Centrum voor Industrieel Beleid / Verkeer en Infrastructuur, Celestijnenlaan 300a, 3001 Heverlee,
E: Thijs.Dewilde@kuleuven.be

³ KU Leuven - Centrum voor Industrieel Beleid / Verkeer en Infrastructuur, Celestijnenlaan 300a, 3001 Heverlee,
E: Tim.Ameye@kuleuven.be

⁴ Plankenbergstraat 112 bus L7, 2100 Deurne,
E: Sels.Peter@gmail.com

⁵ KU Leuven - Centrum voor Industrieel Beleid / Verkeer en Infrastructuur, Celestijnenlaan 300a, 3001 Heverlee,
E: Pieter.Vansteenwegen@kuleuven.be

indirect in het grootste en belangrijkste knelpunt van het netwerk verbetert, wordt een nieuwe dienstregeling berekend. Simulatieresultaten op basis van deze nieuwe dienstregeling voorspellen dat de reizigers tot 3.7% sneller door het bestudeerde knelpunt geloodst kunnen worden. Bovendien daalt de vertraging ten gevolge van conflicten tussen treinen met ongeveer 50%.

Trefwoorden: dienstregeling; reizigersbetrouwbaarheid; robuustheid; simulatie; spoorwegen

1. Inleiding

Overall in het verkeer worden mensen geconfronteerd met vertragingen. Dat is voor treinreizigers uiteraard niet anders. Omdat deze vertragingen meestal het gevolg zijn van verschillende factoren, bijvoorbeeld een panne, weersomstandigheden of gewoon extra drukte, blijkt het in de praktijk onmogelijk alle vertragingen in een treinsysteem te voorkomen. Het komt er dus vooral op aan om op een gepaste manier om te gaan met deze vertragingen en bij de organisatie van het systeem te proberen de gevolgen van deze vertragingen te minimaliseren. Belangrijk daarbij is het onderscheid tussen grote verstoringen zoals een stilgevallen trein die een spoor blokkeert en kleine verstoringen zoals een uitgelopen stoptijd tijdens de spits. Grote verstoringen vereisen real-time ingrepen en omdat hun waarschijnlijkheid (per locatie) laag is, is het meestal niet zinvol er expliciet rekening mee te houden in de (standaard)planning van een treinsysteem. Er kan daarentegen in deze planning wel geanticipeerd worden op kleine dagdagelijkse variaties in rittijden en stoptijden. Zo wordt in een algemene context *een planning robuust* genoemd, wanneer er voldoende extra tijd ingepland is tussen de events om vertragingen op te vangen. In een treinsysteem zou dit inbouwen van extra tijd echter de reistijd voor veel reizigers nodeloos verlengen, waardoor deze aanpak niet aantrekkelijk is voor zowel de spoorwegoperatoren als voor de reizigers.

Toch wordt er in literatuur over treinonderzoek en in de praktijk vaak gesproken over deze klassieke vorm van robuustheid van een treinsysteem, maar even vaak blijkt er iets verschillends bedoeld te worden. Daarom wordt in dit artikel een allesomvattende éénduidige definitie van *robuustheid van een treinsysteem* voorgesteld.⁶ Omdat deze definitie focust op reële reistijden, is deze definitie in principe hanteerbaar voor de hele transportsector, dus ook voor intermodale verplaatsingen van reizigers, autoverkeer en voor vrachtvervoer. In dit artikel zullen we ons echter beperken tot reizigersvervoer binnen treinsystemen. Daarenboven zijn er verschillende planningsniveaus die invloed hebben op de reële reistijden van de treinreizigers en dus ook, volgens onze definitie, op de robuustheid van een treinsysteem, namelijk de lijnplanning, de dienstregeling, het real-time bijsturen, etcetera. Dit artikel beperkt zich wat dit aspect betreft tot de toepassing van het opstellen van een dienstregeling. Met een robuuste dienstregeling bedoelen we dan de impact van deze dienstregeling op de robuustheid van het gehele treinsysteem.

In dit artikel worden eerst verscheidene impliciete en expliciete definities van robuustheid voor spoorssystemen met elkaar vergeleken. Daarna presenteren we ook een nieuwe allesomvattende definitie. De aangeleverde definitie schept niet enkel duidelijkheid over het begrip 'robuustheid', maar maakt het bovendien ook mogelijk om de robuustheid van twee dienstregelingen voor eenzelfde treinsysteem te vergelijken. Zo kan ze gebruikt worden om vooraf de prestaties van een treinsysteem in te schatten, wat bijvoorbeeld nuttig is bij het beoordelen van infrastructuurmaatregelen of dienstregelingswijzigingen. Dat deze definitie voor robuustheid van een treinsysteem inderdaad praktisch bruikbaar is als performantiecriterium, wordt hier aangetoond aan de hand van twee case studies. In deze case studies wordt de robuustheid van een dienstregeling voor grote knelpunten indirect verbeterd met behulp van een optimalisatiealgoritme. Nadien volgt een evaluatie van de bekomen planning met onder andere de nieuw gedefinieerde robuustheid als performantiecriterium. Dit zorgt voor een validatie van de gepresenteerde aanpak. Wat betreft verstoringen beperken we ons in dit artikel tot dagdagelijkse kleine vertragingen.

⁶ Dit artikel is een Nederlandse herwerking van drie gepubliceerde Engelstalige artikels (Dewilde et al., 2011, 2013, 2014). We verwijzen naar deze papers voor de meer technische details.

2. Achtergrond

In deze sectie introduceren we enkele belangrijke concepten die de planning van een treinsysteem in het algemeen en van een dienstregeling in het bijzonder beschrijven. Deze concepten vormen de nodige achtergrond voor de discussie over robuustheid en worden gebruikt bij de validatie van de alomvattende nieuwe definitie voor robuustheid.

Een treinsysteem wordt typisch gepland in drie fasen. De strategische planning is de langetermijnplanning en omvat beslissingen over de infrastructuur en de netwerkplanning (haltes, lijnplanning, frequenties, ...). De tactische planning is op middellange termijn en bestaat uit het plannen van de dienstregeling, de routing door het netwerk, het personeel en het rollend materieel. De operationele planning is de kortetermijnplanning en staat voor het real-time bijsturen of de dispatching.

Omdat verwacht wordt dat treinen volgens hun dienstregeling rijden, wordt een vertraging bij aankomst gedefinieerd als het verschil tussen de reële aankomsttijd en de geplande aankomsttijd. Er wordt typisch onderscheid gemaakt tussen twee soorten vertragingen. *Primaire vertragingen* zijn vertragingen met een externe oorzaak, bijvoorbeeld beperkte zichtbaarheid door slechte weersomstandigheden of (ongewone) drukte op het perron. *Secundaire vertragingen* daarentegen zijn vertragingen die veroorzaakt worden door vertragingen van andere treinen, bijvoorbeeld wanneer een trein opgehouden wordt door een voorgaande trein met vertraging. Het grote verschil tussen beide soorten vertragingen is dat primaire vertragingen nauwelijks te voorkomen zijn, en al helemaal niet bij het plannen van de treinen, terwijl de secundaire vertragingen vaak wel aanzienlijk verminderd kunnen worden door de treinen beter te plannen.

Voor het optimaliseren van het treinverkeer worden in de literatuur *verschillende doelstellingen* vooropgesteld. Een typische doelstelling is het minimaliseren van de gemiddelde vertraging. Andere doelstellingen zijn het streven naar stiptheid (Kroon et al., 2008b), het minimaliseren van het aantal gemiste overstappen (Liebchen et al., 2010), het minimaliseren van de tijd die nodig is om een vertraging te absorberen (Goverde, 2007) of het minimaliseren van de totale geplande reistijd van alle reizigers in het treinsysteem (Engelhardt-Funke en Kolonko, 2004; Goerigk en Schöbel, 2010). Ook het minimaliseren van secundaire vertragingen wordt verondersteld het treinsysteem beter te laten presteren (Goverde, 1998). Het feit dat het in de praktijk zo goed als onmogelijk blijkt om uit vastgestelde vertragingen op te maken welk gedeelte primaire en welk gedeelte secundaire vertragingen zijn (Daamen et al., 2009; Labermeier, 2013), maakt het lastig om deze laatste doelstelling concreet te maken.

Het hoofddoel van een treinsysteem voor personenvervoer is uiteraard om reizigers naar hun bestemming te brengen. Er zijn echter slechts een gering aantal auteurs die hun doelstelling(en) opstellen vanuit het standpunt van de reiziger (Engelhardt-Funke en Kolonko, 2004; Liebchen et al., 2010; Vansteenwegen en Van Oudheusden, 2007, 2006). Een voorbeeld van zo'n doelstelling is het minimaliseren van de gemiddelde vertraging van een passagier. Deze kan in belangrijke mate verschillen van de gemiddelde vertraging van een trein, omdat er niet op elke trein evenveel reizigers zitten en omdat een passagier voor zijn traject meerdere treinen kan nodig hebben, waardoor hij ook vertraging kan oplopen door een gemiste overstap. De meest gangbare manier om deze doelstellingen na te streven is door extra speling te voorzien in de dienstregeling voor het treinsysteem.

Met *speling in een dienstregeling* wordt meer formeel bedoeld dat er extra tijd ingepland wordt voor het traject van een trein of tussen verschillende treinen die eenzelfde deel van de infrastructuur gebruiken. In het eerste geval spreekt men van een *supplement* en in het tweede van een *buffer*. Wanneer een supplement ingebracht is tussen de vertrektijd en de daaropvolgende aankomsttijd van een trein, spreekt men van een rijtijdsupplement, omdat een trein dan meer tijd krijgt om een traject tussen twee stopplaatsen af te leggen. Anderzijds, wanneer de geplande tijd tussen de aankomsttijd en de daaropvolgende vertrektijd van een trein verlengd wordt, spreekt men van een stoptijdsupplement. Een trein krijgt dan meer tijd om stil te

staan in het station zodat de reizigers meer tijd hebben om in of uit te stappen. Een belangrijk onderscheid is dat supplementen steeds zorgen voor een verlenging van de geplande reistijd van passagiers, terwijl dat bij buffers niet altijd het geval is. Een buffer voorziet bijvoorbeeld meer tijd tussen twee opeenvolgende treinen op eenzelfde spoor, wissel of perron, om ervoor te zorgen dat een vertraging van de eerste trein niet doorgegeven wordt aan de tweede trein. Een buffer kan ook gepland worden tussen twee treinen waartussen typisch veel reizigers overstappen. Zo'n buffer wordt een overstapbuffer genoemd en zorgt ervoor dat de reizigers extra tijd hebben om over te stappen. De reizigers die gebruik maken van deze overstap hebben bijgevolg minder kans om hun tweede trein te missen, maar hun geplande reistijd wordt wel verlengd door deze overstapbuffer. Hoewel in bijna alle treinsystemen buffers en supplementen in de dienstregeling ingebouwd zijn om de performantie en betrouwbaarheid van het treinsysteem te verhogen, verschillen het aantal, de duur en de plaatsing ervan sterk.

3. Robuustheid

Betrouwbaarheid en performantie van een transportsysteem zijn belangrijk, omdat ze het transportkeuzegedrag van mensen beïnvloeden (König en Axhausen, 2002; Van Oort, 2011). Om na te gaan hoe goed een treinsysteem presteert en hoe betrouwbaar een treinsysteem is, wordt robuustheid als een essentieel evaluatiecriterium beschouwd (Cacchiani et al., 2014; Schittenhelm en Landex, 2012; Van Oort, 2011). Er zijn echter zeer veel definities voor robuustheid van een treinsysteem in omloop. Daarom worden in deze sectie enkele bestaande interpretaties van robuustheid van een treinsysteem overlopen om van daaruit een alomvattende definitie voor robuustheid te formuleren. Dit overzicht is bijgevolg niet bedoeld om volledig te zijn, maar wordt gebruikt om de trade-off tussen snelle en betrouwbare verplaatsingen onder de aandacht te brengen. Het dient als basis voor het invoeren van onze nieuwe definitie. We bespreken in dit overzicht bovendien enkel definities van robuustheid die gerelateerd zijn aan kleine dagdagelijkse verstoringen. Robuustheid gerelateerd aan grote verstoringen wordt ondermeer bediscussieerd in (Tahmasseby, 2009; Savelberg en Bakker, 2010; Yap, 2014). We beperken ons hierbij ook tot interpretaties van robuustheid die focussen op het tactische niveau. Een verdere aanvulling van dit overzicht kan gevonden worden in (Oudt, 2013).

3.1 Definities

Een eerste interpretatie van robuustheid wordt gegeven door Ben-Tal en Nemirovski:

“In real-world applications of Linear Programming, one cannot ignore the possibility that a small uncertainty in the data can make the usual optimal solution completely meaningless from a practical viewpoint. Naturally, the need arises to develop models that are immune, as far as possible, to data uncertainty.” (Ben-Tal en Nemirovski, 1998)

Wanneer we dit citaat interpreteren in het kader van robuustheid van treinsystemen, is het meteen duidelijk dat het zinloos is om een theoretisch optimaal treinsysteem op te stellen, bijvoorbeeld met minimale reistijden, dat vanaf de kleinste verstoring volledig in het honderd loopt. Deze auteurs stellen voor om een model op te stellen dat immuun is tegen onzekerheid. Dit model kan dan robuust genoemd worden. In termen van een treinsysteem, kan dit geformuleerd worden als ‘een robuust treinsysteem is een treinsysteem dat in de mate van het mogelijke bestand is tegen alle verstoringen’. Deze stabiliteit kan bereikt worden door het invoegen van vele supplementen en buffers. De keerzijde van de medaille is hier dat de reizigers veel langer dan de noodzakelijke trajectduur onderweg zullen zijn en ze bijgevolg het treinsysteem als traag zullen ervaren. Hierbij duidt de noodzakelijke trajectduur op de minimale trajecttijd rekening houdend met de snelheidsbeperkingen en de stoptijden volgens de veiligheidsvoorschriften. Een flexibelere tegenhanger van deze interpretatie van robuustheid is ‘light robustness’ (Fischetti et al., 2009; Fischetti en Monaci, 2009). Hierbij is er een bovengrens op hoeveel langer de reistijden mogen zijn dan de minimale reistijden. Volgens deze omschrijving is een treinsysteem bijgevolg robuust als het in zekere mate bestand is tegen vertragingen en

tegelijkertijd de geplande reistijden binnen zekere grenzen blijven. Hieruit blijkt wel meteen dat het moeilijk is om 'light robustness' concreet te gaan meten.

Een tweede interpretatie is van Goverde:

"A robust timetable must be able to deal with a certain amount of delay without traffic control intervention. Timetable robustness therefore determines the effectiveness of schedule adherence after disruptions." (Goverde, 2007)

Hij stelt dat een robuust treinsysteem bestand moet zijn tegen kleine vertragingen zonder real-time tussenkomsten. Grote verstoringen worden niet in acht genomen. Ook in de andere interpretaties van robuustheid worden grote verstoringen niet in beschouwing genomen. De robuustheid van een treinsysteem geeft hier aan hoe goed het treinsysteem zich kan herstellen na kleine vertragingen. Een manier om deze robuustheid te meten is door na te gaan hoe een vertraging zich zal verspreiden doorheen het treinsysteem.

Het grootste nadeel aan deze omschrijving is dat ze geen rekening houdt met de reistijd van de reizigers. Immers, een treinsysteem met grote buffers en supplementen zal uitstekend bestand zijn tegen kleine vertragingen en zichzelf gemakkelijk kunnen herstellen bij verstoringen, maar verlengt wel de reistijd van de passagiers.

Een derde interpretatie is van Schöbel en Kratz:

"Let a fixed waiting time rule be given as well as a set of source-delayed events. A timetable has the robustness R if all its transfers are maintained whenever all source delays are smaller than or equal to R ." (Schöbel en Kratz, 2009)

Deze omschrijving zegt dat aan elk treinsysteem een waarde toegekend kan worden die weergeeft welke grootte primaire vertragingen maximaal mogen hebben zonder dat passagiers hun overstap missen. Schöbel en Kratz zijn van mening dat een treinsysteem dat volgens bovenstaande omschrijving een hoge waarde toegekend krijgt, daarom nog niet het beste treinsysteem is. Ze stellen dat ook de reizigerstijd een belangrijk criterium is in het bepalen van de performantie van een treinsysteem. Volgens hen is het belangrijk dat er een afweging gemaakt wordt tussen robuustheid, zoals door hen omschreven, en de kost van deze robuustheid, waarbij bedoeld wordt op de verlenging van de reistijden.

Een vierde en een vijfde interpretatie zijn beide van Kroon et al.:

"In order to improve the average delays of the trains in a railway system, it is relevant to look for an optimal allocation of the time supplements and the buffer times in the timetable. ... Note that the re-allocation of time supplements and buffer times may improve the robustness of a timetable against relatively small disturbances only." (Kroon et al., 2008b)

Deze omschrijving zegt dat de robuustheid van een treinsysteem verbeterd kan worden door buffers en supplementen te herverdelen in de dienstregeling zodat de gemiddelde vertraging daalt. Streven naar robuustheid komt bijgevolg overeen met het streven naar een kleinere gemiddelde vertraging onder de beperking dat er geen nieuwe supplementen toegevoegd worden in het treinsysteem. Er wordt daarbij uitgegaan van een op voorhand vastgelegde totale duur van supplementen. Bijgevolg is het wijzigen van de reisduur van passagiers begrensd. Een nadeel is wel dat er gekeken wordt naar de gemiddelde vertraging van treinen en niet van reizigers. In tegenstelling tot de vorige omschrijving wordt hier bijvoorbeeld geen rekening gehouden met het garanderen van overstappen.

"Robustness of a timetable has one or more of the following effects (i) initial disturbances can be absorbed to some extent so that they do not lead to delays, (ii) there are few knock-on delays from one train to another, and (iii) delays disappear quickly, possibly with light dispatching measures. Both (i) and (iii) are a consequence of appropriately placed time supplements in the timetable, and (ii) is a consequence of appropriately placed buffer times between consecutive trains at certain locations. Note that, with light dispatching measures only, a timetable can only be robust against small disturbances." (Kroon et al., 2008a)

Robuustheid wordt hier omschreven aan de hand van een aantal eigenschappen die het teweegbrengt in het treinsysteem, namelijk (i) het in zekere mate bestand zijn tegen initiële verstoringen zodat deze niet leiden tot primaire vertragingen, (ii) het kunnen voorkomen dat primaire vertragingen leiden tot secundaire vertragingen en (iii) het snel kunnen absorberen van vertragingen, eventueel met tussenkomst van eenvoudige dispatching. In het tweede deel van de omschrijving worden buffers en supplementen geassocieerd met deze eigenschappen en wordt opnieuw aangehaald dat enkel kleine vertragingen in acht genomen worden. Hier kan opnieuw opgemerkt worden dat streven naar deze drie eigenschappen niet noodzakelijk een passagiersvriendelijk treinsysteem zal opleveren, omdat het kan leiden tot langere reistijden.

Een definitie die volledig in deze lijn ligt, wordt gegeven door Andersson et al.:

"A robust timetable is a timetable that can recover from small delays and keep the delays from spreading over the network." (Andersson et al., 2013)

Een andere definitie die hier ook bij aansluit is van Policella.:

"The idea of robust schedules consists in solutions that can tolerate a certain degree of uncertainty during execution. In other words, they should be able to absorb dynamic variations in the problem due to both external reasons (exogenous events), and internal reasons (false definitions in the problem)." (Policella, 2005)

Cicerone et al. presenteren een zesde interpretatie van robuustheid:

"The basic idea of robustness is to provide a solution which is able to keep feasibility even if the input instance is disturbed. ... The basic idea of recoverable robustness is to compute solutions that are robust against a limited set of scenarios and for a limited recovery. The quality of the robust solution is measured by its price of robustness that determines the trade-off between an optimal and a robust solution." (Cicerone et al., 2009)

Deze omschrijving van robuustheid sluit erg aan bij de vorige omschrijvingen. De omschrijving van herstelbare robuustheid ('recoverable robustness') is voortgekomen uit de observatie dat bij het opstellen van een dienstregeling geen rekening wordt gehouden met het real-time bijsturen, desondanks dat dit een grote invloed heeft op het functioneren van het treinsysteem. Ook hier wordt aangegeven dat een treinsysteem dat volgens de omschrijving hierboven robuust of herstelbaar robuust is daarom geen optimaal treinsysteem is, omdat robuustheid een kost met zich meebrengt, namelijk langere reistijden. De aanpak van herstelbare robuustheid verschilt van de latere versie van Goerigk en Schöbel, herstellen naar optimaliteit ('recover to optimality' (Goerigk en Schöbel, 2010)), in de zin dat herstelbare robuustheid een dispatching strategie zoekt die het mogelijk maakt dat er een herstel is naar de oorspronkelijke dienstregeling, terwijl bij het herstellen naar optimaliteit gestreefd wordt naar het minimaliseren van alle reistijden, los van de dienstregeling. Een nadeel van een dienstregeling en dispatching strategie die vooropgesteld wordt door Goerigk en Schöbel is dat in geval van verstoringen treinen ook voor hun geplande tijd kunnen vertrekken. Dit kan uiteraard erg vervelend zijn voor sommige reizigers.

Uit voorgaande interpretaties van robuustheid is duidelijk dat de positieve en negatieve effecten van buffers of supplementen in het treinsysteem afgewogen moeten worden. Zowel te veel als te weinig buffers en supplementen zijn nadelig voor de reizigers. Het is duidelijk dat een treinsysteem dat alle vertragingen kan voorkomen en absorberen niet optimaal is vanuit het standpunt van de reiziger, omdat zo'n treinsysteem gepaard gaat met lange reizigerstijden ten gevolge van de vele supplementen en overstapbuffers. Natuurlijk willen passagiers geen vertragingen en goed geplande, haalbare overstappen, maar ze willen tegelijkertijd korte reistijden.

Om aan deze voorwaarden te voldoen en om tegemoet te komen aan de aangehaalde nadelen van bestaande definities, stellen wij een nieuwe definitie voor. We hebben ons hiervoor gebaseerd op een meer algemene definitie van robuustheid voor netwerken van Snelder et al.:

"Onder robuustheid verstaan we het vermogen om de functie waarvoor het netwerk ontworpen is te blijven vervullen, ook in situaties die sterk afwijken van de reguliere gebruikersomstandigheden." (Snelder et al., 2004)

Het achterliggende idee achter deze definitie van robuustheid werd eerder door Vromans geformuleerd als:

"The ability of the railway system to operate normally despite disturbing influences." (Vromans, 2005)

Aangezien de functie van een treinsysteem is om reizigers naar hun bestemming te brengen en liefst zo snel mogelijk, zijn we daarvan vertrokken voor onze definitie van robuustheid van treinsystemen.

In een robuust treinsysteem is de totale (gewogen) reistijd van alle passagiers in de praktijk minimaal, in geval van dagdagelijkse vertragingen.

Deze definitie voor robuustheid van een treinsysteem wijkt duidelijk af van de typische interpretatie van robuustheid omdat ook het minimaliseren van (geplande) reistijden expliciet opgenomen is. Een treinsysteem dat robuust is volgens de typische interpretatie, zoals in de meeste definities hierboven, is enkel interessant als daarnaast ook de reistijden in acht worden genomen. Omgekeerd is een systeem met korte geplande reistijden maar nuttig in de praktijk als de reistijden ook betrouwbaar zijn in geval van kleine verstoringen. We verkiezen hier het herdefiniëren van de term robuustheid omdat het beperken van secundaire vertragingen en een snel herstel na een verstoring volgens ons zinloos zijn als de reistijden van de passagiers in de praktijk niet in acht worden genomen. Zo zouden veel en grote buffers er bijvoorbeeld voor kunnen zorgen dat de robuustheid van een systeem volgens de typische interpretatie verbetert, maar tegelijkertijd zouden veel reistijden nodeloos verlengd worden, waardoor de dienstverlening er zeker niet op vooruitgaat. Om duidelijk aan te geven dat we het over deze nieuwe definitie van robuustheid hebben, en omdat we rekening houden met reizigerstijden in plaats van treintijden, gebruiken we in het vervolg van dit artikel de term 'passagiersrobuustheid'.

Een andere definitie van robuustheid die nauw aansluit bij onze definitie is van Takeuchi et al.:

"Specifically, we define the robustness index as the expected increase in all passenger disutility under the assumption that it is possible to obtain the probability distribution of the frequency, location and length of delays." (Takeuchi et al., 2007)

Deze auteurs evalueren robuustheid door te meten hoeveel ongemak vertragingen teweegbrengen bij passagiers. Hierbij houden ze rekening met de congestie die de passagier onderweg ondervindt, het aantal overstappen dat de passagier moet maken en de totale tijd die de passagier moet wachten in stations. Wij delen dezelfde visie op robuustheid. Het voordeel van onze definitie is echter dat ze positief gedefinieerd is en ze concreter is doordat vertragingen en de volledige reistijd van de passagiers rechtstreeks in rekening worden gebracht.

Merk op dat in onze definitie de reistijden in de praktijk in acht worden genomen en niet de geplande reistijden volgens de dienstregeling. De reistijd in de praktijk is de trajectduur inclusief de vertragingen en de wachttijd door gemiste overstappen. Door te werken met gewogen reistijden wordt er ook rekening gehouden met hoe wachten en vertragingen door de reizigers gepercipieerd worden. Dit houdt bijvoorbeeld in dat de tijd die reizigers onnodig op het perron buiten de trein moeten doorbrengen, zwaarder doorweegt in de berekening van de totale reistijd in de praktijk dan de tijd die reizigers extra doorbrengen op een rijdende trein. Hierbij wordt zowel de geplande extra reistijd, namelijk buffers en supplementen, als de onvoorziene en onvoorspelbare extra reistijd, namelijk vertragingen, in rekening gebracht. We hebben deze definitie voorgesteld aan de Belgische spoorweginfrastructuurbeheerder, Infrabel. Zij reageerden enthousiast en bekijken hoe ze dit in de praktijk kunnen omzetten.

Doordat primaire en secundaire vertragingen zorgen voor een verlenging van de werkelijke reistijd van de passagiers, kan een treinsysteem ook pas passagiersrobuust zijn wanneer de voortgang van vertering beperkt is, net zoals de tijd nodig om vertragingen te absorberen. Deze twee eigenschappen, die vaak terugkomen in de eerder vermelde definities, zijn dus ook impliciet aanwezig in onze definitie, maar passagiersrobuustheid biedt buiten deze

eigenschappen nog het extra voordeel dat buffers en supplementen niet onnodig lang worden en bijgevolg de geplande reistijd niet meer toeneemt dan nodig. Op die manier wordt de effectieve reistijd geminimaliseerd.

3.2 *Discussie over passagiersrobuustheid*

In deze sectie bediscussiëren we de voor- en nadelen van onze definitie van robuustheid. Opdat spoorwegbedrijven robuustheid effectief als performantiecriterium zouden kunnen gebruiken, moet een definitie van robuustheid naar de praktijk vertaalbaar zijn en moet een treinsysteem dat goed scoort op deze robuustheid, aantrekkelijk zijn. Dus naast een definitie voor robuustheid, moet er ook een praktische manier zijn om deze robuustheid te meten, zodat de robuustheid van een treinsysteem bepaald kan worden en het systeem met andere systemen vergeleken kan worden.

Omdat het onderverdelen van vertragingen in primaire en secundaire vertragingen een lastige oefening blijft, is het moeilijk om robuustheid aan de hand van deze twee soorten vertragingen te meten. Ook het aantal gemiste overstappen schiet tekort omdat het aantal gemiste overstappen eenvoudig verlaagd kan worden door extra overstapbuffers in het systeem te brengen, zodat er ruim tijd is om over te stappen, zelfs in het geval van vertragingen. Het meten van robuustheid aan de hand van de voortgang van vertraging kan daarentegen wel efficiënt berekend worden, bijvoorbeeld met de theorie van max-plus algebra, zoals beschreven door Goverde (Goverde, 2005). Het nadeel van deze analytische simulatie is echter dat de vertraging van treinen gemeten wordt en niet van passagiers. De Monte-Carlo simulaties die Takeuchi et al. gebruiken om robuustheid te meten zijn wel gericht op de passagiers (Takeuchi et al., 2007).

Ook onze definitie is gericht op passagiers en houdt in dat de robuustheid van een treinsysteem gemeten kan worden door de werkelijke reistijden van alle passagiers te berekenen. Deze werkelijke reistijden zijn berekenbaar aan de hand van simulatie en dus is deze definitie praktisch bruikbaar. Idealiter zijn voor deze simulatie historische data over dagdagelijkse vertragingen en passagiersaantallen beschikbaar. Deze historische data zijn niet altijd eenvoudig te bekomen, maar vormen tegelijkertijd wel de sterkte van deze manier om robuustheid te meten. Zo geven de passagiersaantallen aan elke trein een gewicht, waardoor treinen met meer passagiers meer invloed hebben op de robuustheid dan treinen die nauwelijks bezet zijn. Ook veel gebruikte overstappen wegen hierdoor meer door. Doordat bovendien gewichten toegekend worden aan ongebruikte supplementen en buffers en het wachten bij een gemiste overstap, wordt ook de perceptie van de passagiers op de overvullige tijd dat ze onderweg zijn, opgenomen in de berekening van robuustheid.

Een treinsysteem dat passagiersrobuust is, is interessant voor zowel de vraag- als aanbodzijde. Spoorwegbedrijven zijn tevreden want de werkelijke reistijden worden geminimaliseerd, wat de reële kosten (inclusief de kosten die gepaard gaan met vertragingen) reduceert. Daarnaast wordt er ook aan de wensen van de reizigers voldaan, omdat alle onnodige wachttijden vermeden worden, er minder overstappen gemist worden en de reiziger in het algemeen ook beter weet waar zich aan te verwachten. Hierdoor zal het treinsysteem door de reiziger als snel en betrouwbaar gepercipieerd worden.

Een voordeel van passagiersrobuustheid is dat het tijdens alle fasen van het planningsproces gebruikt kan worden als optimalisatiecriterium, bijvoorbeeld tijdens de lijnplanning, het opstellen van de dienstregeling en het real-time bijsturen. Hierdoor kunnen deze processen beter op elkaar afgestemd worden en zal de dienstverlening aan de passagiers nog verder verbeteren. Een nadeel is dat om passagiersrobuustheid te evalueren, reële reistijden gekend moeten zijn. Om deze reële reistijden te benaderen lijkt het gebruik van simulatie onmisbaar.

4. Toepassingen

In deze sectie wordt geïllustreerd hoe onze nieuwe definitie van passagiersrobuustheid in de praktijk gebruikt kan worden. Hiervoor zullen we ons, binnen het grotere kader van het ontwerpen van treinsystemen, toespitsen op het evalueren en verbeteren van dienstregelingen en de planning van treinen in stations. Enerzijds zal er een algoritme beschreven worden dat indirect de passagiersrobuustheid van dienstregelingen verbetert. Anderzijds zal passagiersrobuustheid dienen als criterium om dienstregelingen voor een zelfde treinsysteem met elkaar te vergelijken. Om de passagiersrobuustheid van deze dienstregelingen te berekenen zal een simulatiemodel gebruikt worden. In dit simulatiemodel worden stochastische vertragingen toegekend aan een deel van de geplande treinen bij het binnenkomen van het netwerk en bij het stilstaan op de perrons, waardoor treinritten niet meer volgens de dienstregeling kunnen verlopen. Er wordt dan gesimuleerd wat in deze situatie de nieuwe aankomst- en vertrektijden van elke trein in elk station zijn en hoe deze vertragingen het verloop beïnvloeden (bijvoorbeeld welke secundaire vertragingen ze veroorzaken). Met dit simulatiemodel kan ook nagegaan worden welke overstappen niet meer haalbaar zijn in die nieuwe situatie, omdat ook hiervoor de reële aankomsttijden van belang zijn. In de simulatie gebeuren de real-time ingrepen automatisch en volgens het first-come-first-serve principe.

4.1 *Praktisch gebruik van passagiersrobuustheid*

Een vraag die we ons stellen is hoe een passagiersrobuuste dienstregeling opgesteld kan worden. Immers, als tijdens het optimaliseren de reistijd van elke reiziger steeds opnieuw bepaald moet worden is dit computationeel te "duur". Daarom gebruiken we tijdens het optimaliseren een eenvoudigere doelstelling, waarmee we trachten hetzelfde te bereiken. Het uiteindelijke resultaat zal uiteraard wel geëvalueerd worden op basis van passagiersrobuustheid. Zo een eenvoudigere doelstelling is het maximaliseren van alle (minimale) tussentijden tussen elke twee treinen onder de beperking dat alle treinen binnen een vastgelegd tijdsvenster ingepland moeten worden. Dit is in overeenstemming met (Vromans, 2005) waar de som van de kleinste reciproque buffertijden (SSHR) gebruikt wordt als maatstaf.

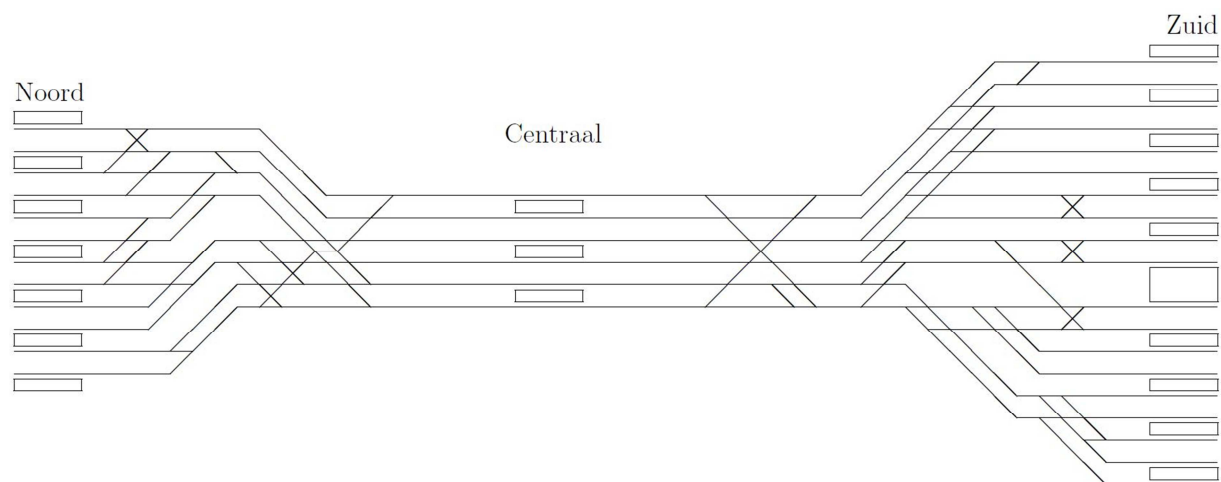
Wij tonen hieronder aan dat het gebruik van deze doelstelling tijdens het optimaliseren wel degelijk de passagiersrobuustheid verhoogt. Het optimalisatiealgoritme bestaat uit een combinatie van het verbeteren van de routing, de vertrek- en aankomsttijden, de volgorde van de treinen en de toekenning van perrons. Hierbij worden stap voor stap de tussentijden tussen elke twee treinen vergroot. Uiteraard moeten alle treinen wel binnen een vastgelegd tijdsvenster ingepland worden. Achteraf wordt dan simulatie gebruikt om het effect op de passagiersrobuustheid te evalueren. Merk echter op dat grote buffers tussen treinen geen garantie bieden op passagiersrobuustheid, maar dat ze wel voortgang van vertraging kunnen verhinderen en op deze manier dus invloed hebben op de reële reistijden van de reizigers. Het evalueren van robuustheid aan de hand van simulatie kan ook gebruikt worden om het effect te onderzoeken van strategische wijzigingen aan het treinsysteem.

Het is gebruikelijk om bij het optimaliseren van de robuustheid enkel te kijken naar de knelpunten in het spoorwegnetwerk. Het idee hierachter is dat de performantie van een heel treinsysteem kan verbeteren door eerst de bottleneck zo goed mogelijk te plannen en daarna de rest van het netwerk hieraan aan te passen (Goldratt en Cox, 1986).

4.2 Case study

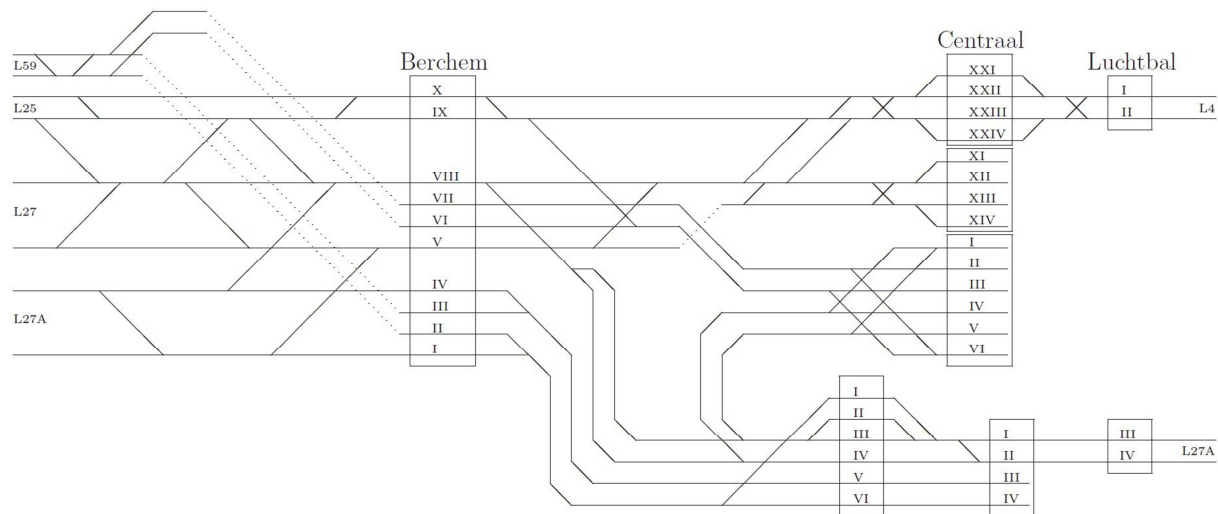
Wij hebben de passagiersrobuustheid geëvalueerd en geoptimaliseerd voor twee bottlenecks in het Belgische spoorwegennetwerk, namelijk Brussel en Antwerpen. Eerst wordt beschreven hoe de spoorwegennetwerken in Brussel en Antwerpen eruit zien en wat hun beperkingen zijn. Daarna worden in een eerste case study enkele performantiecriteriën, waaronder passagiersrobuustheid, vergeleken voor een referentiedienstregeling en een dienstregeling die opgesteld werd met ons optimalisatiealgoritme voor deze twee bottlenecks. Tot slot zijn we in een tweede case study ook gaan kijken wat het effect is van enkele strategische wijzigingen in het spoorwegennetwerk van Brussel op de passagiersrobuustheid. Deze twee case studies dienen als validatie van onze nieuwe definitie van robuustheid. Met de eerste case study wordt aangetoond dat passagiersrobuustheid als criterium gebruikt kan worden om dienstregelingen voor eenzelfde treinsysteem te gaan vergelijken voor ze geïmplementeerd worden. Met de tweede case study wordt aangetoond dat onze definitie van robuustheid ook ingezet kan worden om mogelijke infrastructuurwijzigingen op voorhand tegen elkaar af te wegen.

Het is interessant om de robuustheid van de zogenaamde Noord-Zuid-as in Brussel te evalueren en trachten te verbeteren omdat drie van de vijf drukste stations van België zich daar bevinden. Brussel-Zuid is bovendien het station met het meest aantal perrons in België, namelijk 21 waarvan 19 aan doorlopende sporen. Deze 19 perrons zijn via een tunnel, die slechts zes sporen breed is en het station Brussel-Centraal bevat, verbonden met Brussel-Noord, een station met 12 perrons. Figuur 1 geeft een microscopisch overzicht van de infrastructuur van deze bottleneck. Naast de sporen die naar Brussel-Centraal of naar een rangeerplaats leiden, bevatten Brussel-Zuid en Brussel-Noord nog verschillende sporen die treinen van over het hele land van en naar Brussel leiden. Hierdoor zijn er veel wissels noodzakelijk in deze stationsomgeving. Tijdens de spits wordt de capaciteit van deze bottleneck bijna volledig benut door de meer dan 80 treinen die er op een uur passeren. Al deze factoren tezamen maken dat een kleine vertraging in deze zone zich gemakkelijk verderzet, zowel in tijd als ruimte.



Figuur 1. Microscopisch overzicht van de stationszone van Brussel

Ook de bottleneck in Antwerpen is interessant om te onderzoeken. Figuur 2 is een weergave van de stationszone van Antwerpen. De twee belangrijkste stations in deze zone zijn verbonden met drie corridors die treinen op drie verdiepingen laten toekomen in Antwerpen-Centraal. Ook hier wordt de capaciteit tijdens de spits in hoge mate benut door treinen van verschillende types, gaande van vracht- en lokale treinen tot internationale treinen, en door de kerende beweging die nodig is doordat (met uitzondering van vier sporen) alle sporen in Antwerpen-Centraal doodlopend zijn. Dit veroorzaakt meer beperkingen in het combineren van in- en uitgaande routes en van de perrontoeiening.



Figuur 2. Microscopisch overzicht van de stationszone van Antwerpen

Een groot verschil tussen de stationszone in Brussel en Antwerpen is dat er in de bestaande dienstregeling van Brussel geen rekening gehouden wordt met overstappen. Dit tekort wordt deels opgevangen door de hoge frequentie aan treinen uit alle richtingen die er passeren. In Antwerpen daarentegen zijn overstappen zeer belangrijk omdat bijna alle lijnen hier starten of stoppen.

In Tabel 1 en Tabel 2 wordt de robuustheid van een referentiedienstregeling vergeleken met de robuustheid van een dienstregeling die berekend werd met ons optimalisatiealgoritme. Hierbij werden de passagiersaantallen zo realistisch mogelijk geschat (Sels et al., 2011) en werd historische data gebruikt om een verdeling te verkrijgen van de primaire vertragingen die voorkomen in de praktijk. De resultaten in Tabel 1 en zijn bekomen door simulatie van beide dienstregelingen waarbij externe verstoringen voorkomen volgens deze verdeling. Wanneer er geen initiële of secundaire verstoringen zijn, is de gemiddelde reistijd per passagier doorheen het netwerk in Brussel gelijk aan 5,7 minuten en in Antwerpen aan 11 minuten.

In Tabel 1 en Tabel 2 staat 'Passagiersrobuustheid per passagier' voor de gewogen reistijd in de praktijk per passagier. De rij met 'Secundaire vertragingen per uur (totaal)' geeft het totaal van alle secundaire vertragingen van alle treinen in het netwerk tijdens dat uur. 'Nieuw vertraagde treinen' geeft het percentage treinen die geen vertraging hadden wanneer ze de stationszone binnenkwamen, maar wel bij het buitengaan. De percentages bij 'Extra vertraagde treinen' staan voor dat deel van de treinen die de stationszone met meer vertraging verlaten dan waarmee ze de stationszone zijn binnengekomen.

Tabel 1. (Brussel) Het treinsysteem bekomen door maximalisatie van de spreiding tussen treinen is robuuster dan het referentiesysteem.

	Referentiesysteem	Geoptimaliseerd systeem
Passagiersrobuustheid per passagier	10,7 min	10,3 min (-3,7%)
Secundaire vertragingen per uur (totaal)	35 min	15,7 min (-55,1%)
Nieuw vertraagde treinen	8,5%	3,9%
Extra vertraagde treinen	33,6%	15,9%

Tabel 2. (Antwerpen) Het treinsysteem bekomen door maximalisatie van de spreiding tussen treinen is robuuster dan het referentiesysteem.

	Referentiesysteem	Geoptimaliseerd systeem
Passagiersrobuustheid per passagier	14,8 min	14,1 min (-4,7%)
Secundaire vertragingen per uur (totaal)	70,1 min	42,4 min (-39,5%)
Nieuw vertraagde treinen	13,6%	8,3%
Extra vertraagde treinen	49,1%	30,0%

We zien dat het geoptimaliseerde systeem het in beide zones voor alle criteria beter doet dan het referentiesysteem. Het groter aantal secundaire vertragingen en extra vertraagde treinen in Antwerpen kan verklaard worden doordat Antwerpen-Centraal een terminus is. Treinen op een doodlopend spoor bezetten immers langer de infrastructuur dan doorgaande treinen. Verder zijn in Brussel en Antwerpen dezelfde trends op te merken. De passagiersrobuustheid verbetert met 3,7% in Brussel en 4,7% in Antwerpen. Op het eerste zicht lijkt deze verbetering misschien weinig, maar de minimale reistijd die de treinen nodig hebben en de initiële vertragingen die verondersteld worden in het vertragingsscenario liggen vast en kunnen niet gereduceerd worden. Met onze aanpak kunnen enkel de secundaire vertragingen gereduceerd worden en hiervoor stellen we in beide zones wel een enorme verbetering vast: het aantal secundaire vertragingen daalt met 55,1% in Brussel en met 39,5% in Antwerpen. Er is ook een significante reductie in het aantal gehinderde treinen.

Op vraag van de Belgische spoorweginfrastructuurbeheerder Infrabel zijn er ook drie mogelijke strategische wijzigingen aan het treinsysteem onderzocht om de robuustheid in Brussel te verbeteren. Deze voorstellen zijn uitgekozen op basis van het feit dat ze het capaciteitsgebruik doen dalen of omdat ze de capaciteit van de bottleneck vergroten. Het eerste voorstel bestaat uit het verwijderen van 4 of 10 treinen uit het systeem van 80 treinen per uur (voorstel 1a en 1b respectievelijk). De weggelaten treinen zijn gekozen op basis van hun lage bezettingsgraad. De passagiers van deze treinen worden toegewezen aan andere treinen. Daarbij veronderstellen we dat de aanpassing aan de nieuwe dienstregeling door de passagiers geen deel uitmaakt van hun reële reistijd. Het tweede voorstel behoudt de 80 treinen in het systeem, maar verandert het stoppatroon van treinen die stoppen op perron 1 of 2 in Brussel-Centraal. Deze treinen stoppen in het tweede alternatieve voorstel niet meer in Brussel-Centraal. De passagiers die zouden afstappen in Brussel-Centraal zijn verondersteld over te stappen op een trein die wel stopt in Brussel-Centraal waardoor hun reistijd met 3 minuten verlengd wordt. De passagiers op de doorrijdende treinen boeken een tijdswinst van 1 minuut. Het derde voorstel focust op de infrastructuur in het Centraal station door het aantal perrons van 6 naar 10 te verhogen. Treinen die normaal toekomen op de buitenste perrons worden nu gelijkmatig verdeeld over deze perrons en de nieuwe perrons.

Om de impact van deze voorstellen op de robuustheid te onderzoeken zijn er verschillende artificiële scenario's gebruikt met kansverdelingen voor initiële vertragingen en vertragingen die treinen oplopen in Brussel-Centraal. Door deze uiteenlopende vertragingsscenario's hopen we de scenario's die werkelijk voorkomen ook af te dekken. Al deze artificiële scenario's leverden echter vergelijkbare resultaten op. In Tabel 3, Tabel 4 en Tabel 5 presenteren we bij wijze van voorbeeld de resultaten voor twee van deze scenario's. Het referentiesysteem is in de tabel aangegeven als 'referentie' en 'optimalisatie' wijst op de dienstregeling die verkregen is door ons optimalisatiealgoritme op het referentiesysteem toe te passen. De eerste twee kolommen van Tabel 3 komen dus overeen met Tabel 1. De andere kolommen in onderstaande tabellen bevatten de resultaten van de verschillende voorstellen. De resultaten voor deze voorstellen zijn telkens bekomen door ons optimalisatiealgoritme toe te passen op de nieuwe situatie.

Tabel 3. Simulatieresultaten voor scenario 1

	Referentie	Optimalisatie	Voorstel 1a	Voorstel 1b	Voorstel 2	Voorstel 3
Passagiers- robuustheid	10,7 min	10,3 min (-3,7%)	9,1 min (-15,0%)	8,2 min (-23,4%)	10,7 min (-0,0%)	10,1 min (-5,6%)
Secundaire vertragingen per uur (totaal)	35,0 min	15,7 min (-55,1%)	9,1 min (-74,0%)	4,8 min (-86,3%)	12,6 min (-64,0%)	12,7 min (-63,7%)
Nieuw vertraagde treinen	8,5%	3,9%	2,7%	1,8%	4,0%	3,2%
Extra vertraagde treinen	33,6%	15,9%	10,6%	6,0%	14,0%	13,4%

Tabel 4. Simulatieresultaten voor scenario 2

	Referentie	Optimalisatie	Voorstel 1a	Voorstel 1b	Voorstel 2	Voorstel 3
Passagiers- robuustheid*	10,8 min	10,3 min (-4,6%)	9,1 min (-15,7%)	8,2 min (-24,1%)	10,7 min (-0,9%)	10,1 min (-6,5%)
Secundaire vertragingen per uur (totaal)	36,7 min	16,8 min (-54,2%)	9,8 min (-73,3%)	5,3 min (-85,6%)	13,4 min (-63,5%)	13,5 min (-63,2%)
Nieuw vertraagde treinen	10,1%	4,7%	3,3%	2,1%	4,6%	3,9%
Extra vertraagde treinen	34,6%	16,4%	11,0%	6,3%	14,2%	13,9%

Tabel 5. Voorstel 1 doet de hoeveelheid secundaire vertragingen het meest dalen (scenario 1).

Secundaire vertragingen per uur (totaal) in minuten	Referentie	Optimalisatie	Voorstel 1a	Voorstel 1b	Voorstel 2	Voorstel 3
Noord	7,2	3,4 (-52,8%)	1,6 (-77,8%)	1,1 (-84,7%)	3,5 (-51,4%)	4,5 (-37,5%)
Noord-Centraal	4,8	1,3 (-72,9%)	0,6 (-87,5%)	0,3 (-93,8%)	1,3 (-72,9%)	1,7 (-64,6%)
Centraal	16,0	9,3 (-41,9%)	5,5 (-65,6%)	2,8 (-82,5%)	5,8 (-63,8%)	4,9 (-69,4%)
Centraal-Zuid	4,0	1,3 (-67,5%)	0,8 (-80,0%)	0,4 (-90,0%)	1,3 (-67,5%)	1,4 (-65,0%)
Zuid	2,9	0,5 (-82,8%)	0,6 (-79,3%)	0,1 (-96,6%)	0,6 (-79,3%)	0,4 (-86,2%)
Totaal	35,0	15,7 (-55,1%)	9,1 (-74,0%)	4,8 (-86,3%)	12,6 (-64,0%)	12,7 (-63,7%)

Uit deze tabellen is duidelijk dat voorstel 1, namelijk het verminderen van het aantal treinen ten opzichte van het referentiesysteem, de andere voorstellen overtreft. Dit kan verklaard worden door het feit dat het verwijderen van treinen uit het systeem ervoor zorgt dat de capaciteitsbenutting in heel de stationszone daalt, terwijl de andere twee voorstellen enkel effect

hebben op Brussel-Centraal. Dit blijkt ook uit Tabel 5, die weergeeft dat voorstel 1 de secundaire vertraging in elk deelgebied doet dalen ten opzichte van het geoptimaliseerde systeem, terwijl dit bij voorstel 2 en 3 enkel zo is in Brussel-Centraal. In dit station blijkt voorstel 3 voor een grotere verbetering te zorgen dan voorstel 2. Dit is niet verwonderlijk omdat voorstel 3 de benutting van vier van de zes sporen beïnvloedt, terwijl bij voorstel 2 initieel de bezetting van slechts twee van de zes sporen wordt beïnvloed. Merk op dat de passagiersrobuustheid voor voorstel 2 slechts in kleine mate verbeterd is ten opzichte van het geoptimaliseerde referentiesysteem. Dit komt door de gestegen minimale reistijd van de passagiers die nu moeten overstappen en die niet opweegt tegen de daling van de minimale reistijd van de passagiers op de doorrijdende trein. De hoeveelheid secundaire vertragingen en het percentage extra vertraagde treinen verbetert daarentegen wel beduidend meer voor voorstel 2. Dit voorstel scoort bijgevolg goed op stiptheid, maar niet op het voorzien van korte reistijden.

Naast deze positieve resultaten voor de bottlenecks in het Belgische spoorwegennetwerk, heeft de Belgische spoorweginfrastructuurbeheerder Infrabel een validatiestudie op het uitgebreide netwerk rond Antwerpen uitgevoerd en vastgesteld dat er geen essentiële conflicten voorkomen in de door ons opgestelde dienstregeling.

5. Conclusie en verder onderzoek

In dit artikel wordt een allesomvattende en praktisch bruikbare definitie van de robuustheid van een treinsysteem voorgesteld: "In een robuust treinsysteem is de totale (gewogen) reistijd van alle passagiers in de praktijk minimaal, in geval van dagdagelijkse vertragingen." Deze interpretatie wordt hier *passagiersrobuustheid* genoemd, omdat ze gedefinieerd is vanuit het standpunt van de passagier. Ze houdt rekening met stabiliteit, betrouwbaarheid, goede overstappen en korte reistijden. Deze definitie zorgt niet alleen voor een systeem dat bestand is tegen kleine verstoringen, maar zorgt er ook voor dat de reistijd voor de reizigers nergens nodeloos wordt verlengd. Infrabel, de Belgische spoorweginfrastructuurbeheerder, heeft deze interpretatie van robuustheid enthousiast onthaald. Een belangrijk pluspunt is dat deze definitie ook duidelijk weergeeft hoe passagiersrobuustheid in de praktijk kan gemeten worden. In deze meting wordt bovendien rekening gehouden met hoe passagiers overtollige wachttijd en vertragingen ervaren.

Daarnaast hebben wij ook succesvol een algoritme toegepast dat de tussentijd tussen elke twee treinen maximaliseert. We verbeteren de routing, de vertrek- en aankomsttijden, de volgorde van de treinen en de toekenning van perrons onder de beperking dat alle treinen binnen een vastgelegd tijdsvenster ingepland moeten worden. Wanneer een referentiedienstregeling voor de Belgische knelpunten Brussel of Antwerpen met dit algoritme geoptimaliseerd wordt, verbetert de passagiersrobuustheid met ongeveer 4,2%. Deze nieuwe definitie voor robuustheid is ook gebruikt om verschillende voorstellen op strategisch niveau te evalueren die de robuustheid van het treinsysteem zouden kunnen verbeteren. Hiermee hebben we aangetoond hoe deze nieuwe definitie gebruikt kan worden in de praktijk en kan zorgen voor een performant treinsysteem.

Mogelijk verder onderzoek is het in rekening brengen van overstappen in het optimalisatie-algoritme. Hiervoor zal er gekeken moeten worden naar de positieve en negatieve effecten van grotere overstapsbuffers. Een andere mogelijke verbetering is om expliciet rekening te houden met de passagiersaantallen tijdens het optimalisatie-algoritme.

Referenties

- Andersson, E.V., Peterson, A., Törnquist Krasemann, J., 2013. *Quantifying railway timetable robustness in critical points*. *Journal of Rail Transport Planning & Management* 3, 95–110.
- Ben-Tal, A., Nemirovski, A., 1998. *Robust Convex Optimization*. *Mathematics of Operations Research* 23, 769–805.
- Cacchiani, V., Huisman, D., Kidd, M., Kroon, L., Toth, P., Veelenturf, L., Wagenaar, J., 2014. *An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling*. *Transportation Research Part B: Methodological* 63, 15–37.
- Cicerone, S., D'Angelo, G., Di Stefano, G., Frigioni, D., Navarra, A., Schachtebeck, M., Schöbel, A., 2009. *Recoverable robustness in shunting and timetabling*. In: *Robust and Online Large-Scale Optimization*. Ed. by Ahuja, R., Möhring, H., Zaroliagis, C. Vol. 5868. *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, 28–60.
- Daamen, W., Goverde, R.M.P., Hansen, I.A., 2009. *Non-Discriminatory Automatic Registration of Knock-On Train Delays*. *Networks and Spatial Economics* 9, 47–61.
- Dewilde, T., Sels, P., Cattrysse, D., Vansteenwegen, P., 2011. *Defining Robustness of a Railway Timetable*. In: *Proceedings of 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailRome)*. Rome, Italië.
- Dewilde, T., Sels, P., Cattrysse, D., Vansteenwegen, P., 2013. *Robust railway station planning: An interaction between routing, timetabling and platforming*. *Journal of Rail Transport Planning & Management* 3, 68–77.
- Dewilde, T., Sels, P., Cattrysse, D., Vansteenwegen, P., 2014. *Improving the robustness in railway station areas*. *European Journal of Operational Research* 235, 276–286.
- Engelhardt-Funke, O., Kolonko, M., 2004. *Analysing stability and investments in railway networks using advanced evolutionary algorithms*. *International Transactions in Operational Research* 11, 381–394.
- Fischetti, M., Monaci, M., 2009. *Light robustness*. In: *Robust and Online Large-Scale Optimization*. Ed. by Ahuja, R., Möhring, H., Zaroliagis, C. Vol. 5868. *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, 61–84.
- Fischetti, M., Salvagnin, D., Zanette, A., 2009. *Fast approaches to improve the robustness of a railway timetable*. *Transportation Science* 43, 321–335.
- Goerigk, M., Schöbel, A., 2010. *An Empirical Analysis of Robustness Concepts for Timetabling*. In: *Proceedings of the 10th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS)*. Ed. by Erlebach, T., Lübbecke, M. Vol. 14. *OpenAccess Series in Informatics (OASIS)*. Dagstuhl, Duitsland, 100–113.
- Goldratt, E.M., Cox, J., 1986. *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*. North River Press.
- Goverde, R.M., 1998. *Synchronization control of scheduled train services to minimize passenger waiting times*. In: *Proceedings of the 4th TRAIL Annual Congress, part 2*. Delft, Nederland.
- Goverde, R.M.P., 2007. *Railway timetable stability analysis using max-plus system theory*. *Transportation Research Part B: Methodological* 41, 179–201.

- Goverde, R.M.P., *Netherlands Research School for Transport*, 2005. Punctuality of railway operations and timetable stability analysis. PhD thesis. Netherlands TRAIL Research School, Technische Universiteit, Delft, Nederland.
- König, A., Axhausen, K.W., 2002. The Reliability of the Transportation System and its Influence on the Choice Behaviour. In: *Proceedings of the 2nd Swiss Transportation Research Conference*. Monte Verit, Zwitserland.
- Kroon, L., Huisman, D., Maroti, G., 2008a. Optimisation Models for Railway Timetabling. In: *Railway Timetable & Traffic: Analysis, Modelling and Simulation*. Ed. by Hansen, I., Pahl, J., Eurailpress, Hamburg, 135-154.
- Kroon, L., Maróti, G., Helmrich, M.R., Vromans, M., Dekker, R., 2008b. *Stochastic improvement of cyclic railway timetables*. *Transportation Research Part B: Methodological* 42, 553-570.
- Labermeier, H., 2013. On the Dynamic of Primary and Secondary Delay. In: *Proceedings of the 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailCopenhagen)*. Kopenhagen, Denemarken.
- Liebchen, C., Schachtebeck, M., Schöbel, A., Stiller, S., Prigge, A., 2010. *Computing delay resistant railway timetables*. *Computers & Operations Research* 37, 857-868.
- Oudt, S., 2013. *A Robust Railway System*, A theoretical approach to enhancing the robustness of the railway system in the Netherlands. Master Thesis Science and Business Management. Universiteit Utrecht, Utrecht, Nederland.
- Policella, N., 2005. *Scheduling with uncertainty: a proactive approach using partial order schedules*. *AI Communications* 18, 165-167.
- Schittenhelm, B., Landex, A., 2013. Development and application of Danish Key Performance Indicators for Railway Timetables. In: *Proceedings of the 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailCopenhagen)*. Kopenhagen, Denemarken.
- Schöbel, A., Kratz, A., 2009. A bicriteria approach for robust timetabling. In: *Robust and Online Large-Scale Optimization*. Ed. by Ahuja, R., Möhring, H., Zaroliagis, C. Vol. 5868. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 119-144.
- Sels, P., Dewilde, T., Cattrysse, D., Vansteenwegen, P., 2011. Deriving all Passenger Flows in a Railway Network from Ticket Sales data. In: *Proceedings of 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailRome)*. Rome, Italië.
- Snelder, M., Immers, B., Wilmink, I., 2004. De begrippen betrouwbaarheid en robuustheid nader verklaard. In: *Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk*. Zeist, Nederland.
- Tahmasseby, S., 2009. *Reliability in urban public transport network assessment and design*. Netherlands TRAIL Research School, Technische Universiteit, Delft, Nederland.
- Takeuchi, Y., Tomii, N., Hirai, C., 2007. Evaluation Method of Robustness for Train Schedules. In: *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute* 48, 197-201.
- Van Oort, N., 2011. *Service Reliability and Urban Public Transport Design*. PhD Thesis. Netherlands TRAIL Research School, Delft, Nederland.

Vansteenwegen, P., Van Oudheusden, D., 2006. *Developing railway timetables which guarantee a better service*. European Journal of Operational Research 173, 337–350.

Vansteenwegen, P., Van Oudheusden, D., 2007. *Decreasing the passenger waiting time for an intercity rail network*. Transportation Research Part B: Methodological 41, 478–492.

Savelberg, F., Bakker, P., 2010. *Betrouwbaarheid en robuustheid op het spoor*. Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid, Den Haag, Nederland.

Vromans, M., 2005. *Reliability of Railway Systems*. TRAIL Research School, Erasmus Universiteit Rotterdam, Nederland.

Yap, M., 2014. *Robust public transport from a passenger perspective: A study to evaluate and improve the robustness of multi-level public transport networks*. Master thesis, Technische Universiteit, Delft, Nederland.