



Delft University of Technology

Inaugural speech 'Waar gaan we heen met de trein?'

Goverde, Rob

Publication date

2018

Document Version

Final published version

Citation (APA)

Goverde, R. (2018). *Inaugural speech 'Waar gaan we heen met de trein?'*.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

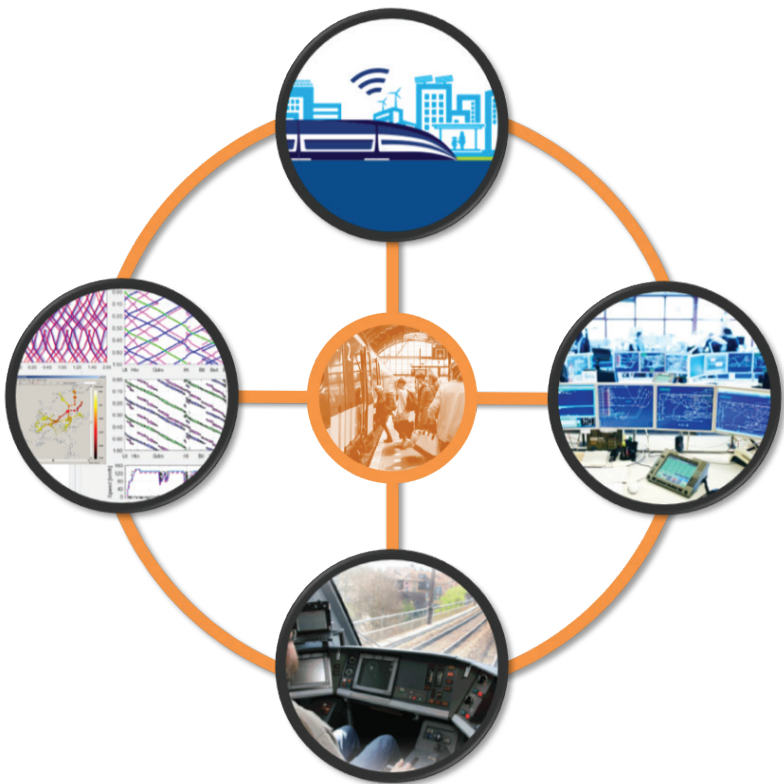
Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Prof. dr. R.M.P. Goverde

Waar gaan we heen met de trein?



Waar gaan we heen met de trein?

Intreerede

In verkorte vorm uitgesproken op 9 november 2018
ter gelegenheid van de aanvaarding van
het ambt van hoogleraar 'Railway traffic operations and management'
aan de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
van de Technische Universiteit Delft

door

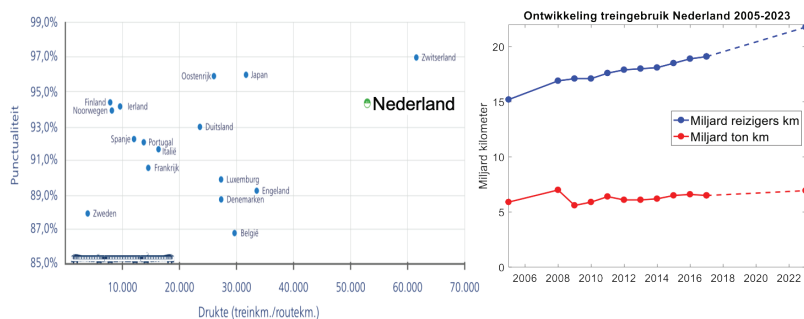
Prof. dr. R.M.P. Goverde

*Mijnheer de Rector Magnificus,
Leden van het College van Bestuur,
Collegae hoogleraren en andere leden van de universitaire gemeenschap,
Zeer gewaardeerde toehoorders,
Dames en heren,*

Het is mij een eer om hier vandaag mijn oratie te houden ter aanvaarding van de ambt als hoogleraar in de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen aan de Technische Universiteit Delft op het vakgebied van de Railverkeerskunde onder het motto: 'Waar gaan we heen met de trein?'.

Achtergrond

Waar gaan we heen met de trein? Nederland heeft een van de hoogst benutte spoornetten van Europa en de treinen hebben een hoge punctualiteit (Figuur 1, links). Die stiptheid is ook nodig om de vele treinen te kunnen verwerken. De vraag naar spoorvervoer blijft stijgen bij zowel reizigersvervoer als goederenvervoer (Figuur 1, rechts). Nederland heeft 7146 km spoor met 404 stations (ProRail, 2017). Het aantal reizigerskilometers per spoor nam toe van 15,2 miljard in 2005 tot 19,9 miljard in 2016 over alle vervoerders. Verwacht wordt dat die groei doorzet met 14% tussen 2017 en 2023 (KiM, 2018). Ook het goederenvervoer per spoor is na de economische crisis over de laatste vijf jaar licht gegroeid van 6,1 miljard tonkilometer in 2012 tot 6,5 miljard in 2017. Verwacht wordt dat deze groei tot 2023 doorzet met gemiddeld 1,1% per jaar (KiM, 2018). De groei op het spoor hangt sterk af van de economische ontwikkelingen, de aantrekkelijkheid van het spoor ten opzichte van de andere vervoerwijzen en de mogelijkheid om te groeien.



Figuur 1. Drukke op het Nederlandse spoor (bronnen: NS (2017), KiM (2018))

Het netwerk kan op diverse plekken nog worden uitgebreid met bijvoorbeeld een verdubbeling van het aantal sporen van enkelspoor naar dubbelspoor, en van dubbelspoor naar viersporige spoorlijnen. Spooruitbreiding is echter zeer kostbaar, bestaat uit langdurige projecten, en is vaak moeilijk inpasbaar in de bestaande omgeving. Dit geldt zeker ook voor uitbreiding van de stationsemplacementen terwijl dit veelal de knelpunten zijn. Sterker nog, ook de drukte op de perrons neemt toe waardoor deze op grote stations ook verbreed moeten worden om de reizigersgroei op te vangen. Dit gaat soms ook ten koste van het aantal stationssporen, zoals op Utrecht Centraal en Amsterdam Centraal.

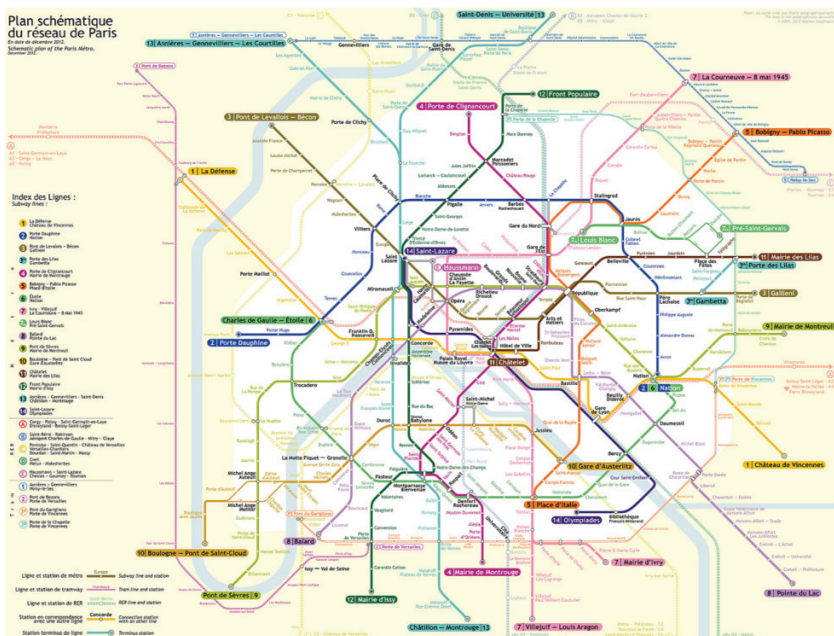


Figuur 2. Europees hogesnelheidsnetwerk (18000 km) (Bron: Wikipedia)

Internationaal zien we dezelfde uitdagingen. Het Europese hogesnelheids-netwerk (Figuur 2) breidt steeds meer uit en daardoor neemt het spoor een steeds groter aandeel van het vliegverkeer over. Tot een afstand van 800 km en een reistijd van 4,5 uur kan de deur-tot-deur reistijd met spoor korter zijn dan met het vliegtuig. China heeft het grootste hogesnelheidsnetwerk van de wereld en ook het drukste. Bovendien is

het in een record tijd gebouwd met deels snelheidsverhogingsprojecten en deels nieuwbouw. In 2007 ging de eerste Chinese hogesnelheidslijn in bedrijf tegelijk met onze HSL-Zuid. Sindsdien heeft China in tien jaar tijd het hogesnelheidsnetwerk uitgebreid tot momenteel 27000 km, ongeveer 65% van de hogesnelheidssporen in de wereld, terwijl de bedoeling is om het verder uit te bouwen tot 38000 km in 2025. Het heeft een enorme impact gehad op het vliegverkeer en commerciële vluchten tot 500 km zijn volledig verdwenen. Het is een groot succes en daarmee zijn er ook grote uitdagingen met de capaciteit en punctualiteit.

Wereldwijd zien we ook problemen met de bereikbaarheid en luchtvervuiling in de grote steden door de verstedelijking en de intensieve automobiliteit. Metronetwerken zijn onmisbaar in de metropolen om de mobiliteit van grote stromen reizigers te waarborgen. De frequenties van de metro's worden steeds verder opgevoerd om zoveel mogelijk reizigers te vervoeren. De modernste metrolijnen gebruiken autonoom rijdende metro's zonder bestuurder waarmee opvolgtijden onder twee minuten zijn gerealiseerd, zoals lijn 14 in Parijs waar 85 s gehaald wordt (Figuur 3). De stabiliteit van deze hoogfrequente spoorlijnen bij de geringste verstoringen vormt een bijzondere uitdaging.



Figuur 3. Metronetwerk Parijs (Bron: Wikipedia)

Ik zie in deze technologische en maatschappelijke ontwikkelingen een grote uitdaging om methoden en technieken te ontwikkelen om spoor beter te benutten door efficiënter plannen en besturen van het railverkeer ondersteund door geavanceerde digitale communicatie- en beveiligingssystemen en (gedeeltelijk) automatische treinbesturing die korte opvolgtijden mogelijk maken bij knelpunten (Figuur 4). De digitalisering van de huidige railsystemen biedt kansen om functionaliteiten in de planning, beveiliging en beheersing uit te breiden. Daarvoor is nog wel veel onderzoek nodig. Dat is de uitdaging waar ik me sterk voor maak en die ik samen met de spoorsector verder wil realiseren.



Figuur 4. Digitalisering en automatisering

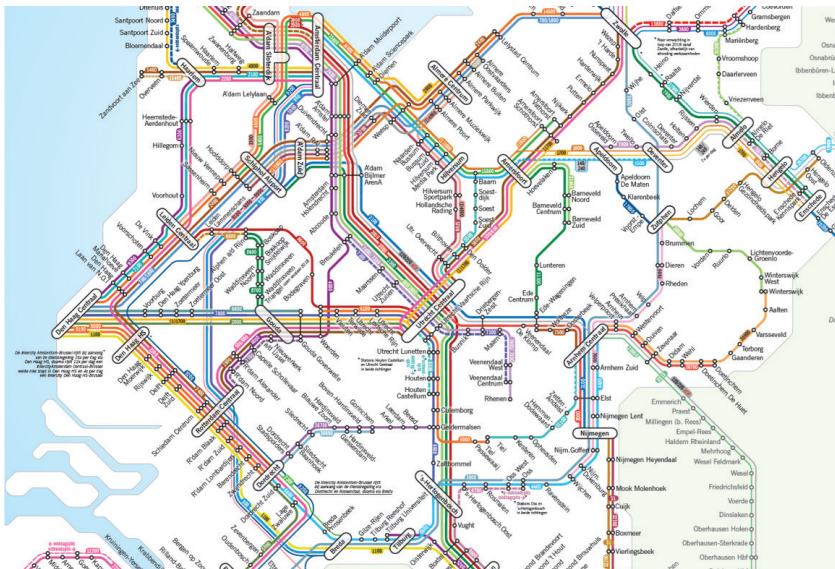
In deze oratie focus ik me op een aantal ontwikkelingen die de technologie en prestaties van railverkeerssystemen drastisch zullen veranderen. Daarbij ga ik achtereenvolgens in op nauwkeurig dienstregelingsontwerp, automatische treinbesturing, intelligent railverkeersmanagement en digitale treinbeveiliging, waarna ik de noodzaak van een integrale systeemaanpak benadruk. Ik eindig met mijn visie op railonderwijs.

Nauwkeurig dienstregelingsontwerp

De dienstregeling is de basis van het spoorvervoer. De dienstregeling bevat het plan voor alle treinen met hun lijnvoeringen, d.w.z. de route tussen herkomst en bestemming en alle haltes onderweg (Figuur 5). Voor reizigers zijn met name de aankomst- en vertrektijden van belang samen met het perronspoor waar de trein stopt. Deze zijn te vinden in het spoorboekje, de vertrekstaten op het station, en de reisplanners. De aankomst- en vertrektijden met de perronsporen zijn echter het topje van de ijsberg.

De dienstregeling bevat naast de reigerstreinen ook goederentreinen, werktreinen en leegmaterieelritten naar bijvoorbeeld de onderhoudswerkplaatsen. De dienstregeling coördineert alle treinen in plaats en

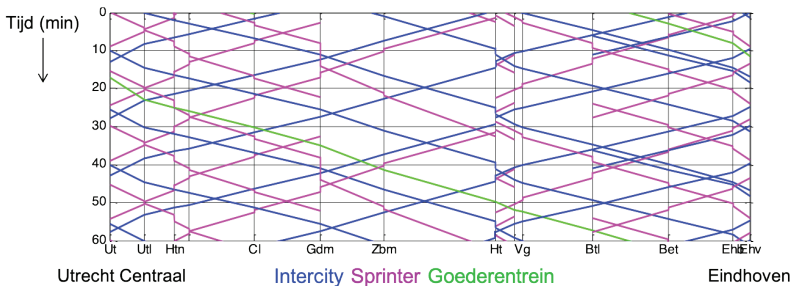
tijd, de zogenoemde treinpaden, zoals te zien in een tijdwegdiagram en basisspooropstelling. Figuur 6 geeft een voorbeeld van een tijdwegdiagram voor een basisuurpatroon, met horizontaal de afstand en verticaal de tijd. Horizontaal zijn de opeenvolgende stations te zien. De stations zijn verbonden met tijdweglijnen, hoe steiler de lijn des te sneller de trein. De verticale lijntjes geven de halteertijden aan op de stations. Kruisende lijnen zijn inhalingen. De dienstregeling beschrijft precies wanneer en over welke sporen en rijwegen over stations de treinen rijden. Daarnaast is de dienstregeling de basis van de materieelomlopen en de roosters van het rijdend personeel, de machinisten en de conducteurs, en is ze gekoppeld aan de automatische rijweginstelling in stations. De timing moet dus lopen als een trein zodat treinen elkaar niet in de weg zitten.



Figuur 5. Lijnennetwerk (Bron: NS)

Het berekenen van een dienstregeling voor het Nederlandse spoornet is een uitdagend optimaliseringsprobleem. De dienstregeling moet voldoen aan een groot aantal nevenvoorwaarden, zoals minimum rijtijden tussen de stations en minimum halteertijden op de stations. Daarnaast kunnen treinen niet tegelijkertijd over hetzelfde spoor rijden dus moet een keuze worden gemaakt over de volgorde van treinen over de spoorlijnen en over de wissels bij conflicterende rijwegen in stations, waarbij ook

minimum opvolgtijden in acht moet worden gehouden zodat de treinen ongehinderd kunnen doorrijden rekening houdend met het seinstelsel. Treinen van dezelfde treinserie met een bepaalde frequentie moeten ook in een vaste regelmaat rijden en overstaptijden op stations waar treinen uit verschillende richtingen samenkomen moeten haalbaar en niet te lang zijn. Het is een hele uitdaging om een oplossing te vinden die voldoet aan al deze eisen. We zijn echter niet alleen geïnteresseerd in een toelaatbare dienstregeling die aan alle nevenvoorwaarden voldoet, maar we willen een optimale dienstregeling vinden tussen alle mogelijke dienstregelingen. Dat kost nog meer rekentijd. En bovendien: wat is optimaal?



Figuur 6. Tijdwegdiagram van een dienstregeling tussen Utrecht Centraal en Eindhoven (Goverde e.a., 2016)

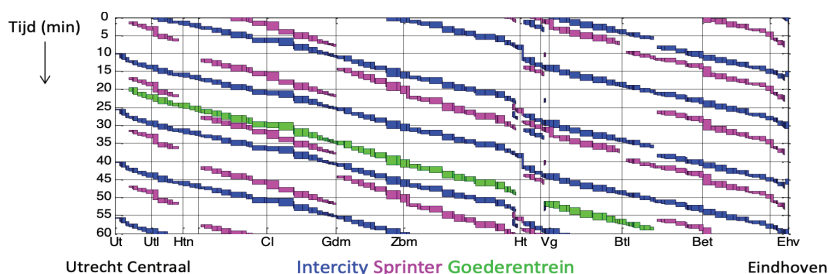
Reizigers willen korte reistijden en ook de vervoerders willen korte rijtijden zodat zo min mogelijk rijdend personeel en rollend materieel nodig is. Een voor de hand liggende doelfunctie is dan de som van alle geplande reistijden of de wachttijden die hierin verwerkt zitten. Dit geeft het optimaliseringsprobleem om de optimale aankomst- en vertrektijden te bepalen voor alle treinen op alle stations zodat de totale wachttijd wordt geminimaliseerd.

Bij een toenemende benutting van het spoor wordt het railverkeer ook steeds vatbaarder voor vertragingen en verstoringen. Een op papier mooi geplande reistijd kan dan opeens twee keer zo lang worden als bijvoorbeeld een aansluiting wordt gemist. Ook kost het extra rijtijd, capaciteit en energie als een trein buiten een station voor een rood sein moet stoppen en wachten op een vertraagde voorgaande trein. Bij het ontwerp van de dienstregeling moet daarom rekening worden gehouden met het feit dat treinen niet altijd precies volgens plan rijden. Iedere rit is net weer wat anders door bijvoorbeeld een andere treinsamenstelling, verschillend rijgedrag van machinisten, fluctuaties in instaptijd en uitstaptijd van reizigers,

en weersomstandigheden. Een dienstregeling moet daarom robuust zijn tegen dagelijkse variaties in de rij- en halteertijden. De dienstregeling bevat daarom een minimale hoeveelheid speling in de rijtijden om variatie in de rijtijd op te vangen. Bij vertraging kan deze speling ook gebruikt worden om sneller te rijden en daarmee de vertraging er weer uit te rijden. Ook worden buffertijden tussen treinpaden ingepland zodat een trein iets vertraagd kan zijn zonder dat een andere trein direct gehinderd wordt en moet remmen voor een rood sein. De uitdaging van een robuuste dienstregeling is dan om de beschikbare speling optimaal te verdelen over en tussen de treinen, en zo de verwachte reistijden te minimaliseren en een betrouwbare dienstregeling te garanderen. De doelfunctie is dan dus niet meer de geplande reistijden maar de verwachte reistijden in de dienstuitvoering.

Vanwege de krapte op het spoor wordt het echter een steeds grotere uitdaging om alle treinen in te plannen en moeten steeds meer concessies worden gedaan zoals de regelmaat wat losser laten, langer halteren van een sprinter op een station zodat een intercity kan inhalen, of langzamer rijden van een intercity totdat die een sprinter kan inhalen. Hier zit duidelijk een wisselwerking tussen de kwaliteit van de vervoerdiensten en de capaciteit van het spoor. Drukker spoor vereist meer capaciteit om dezelfde kwaliteit te bieden.

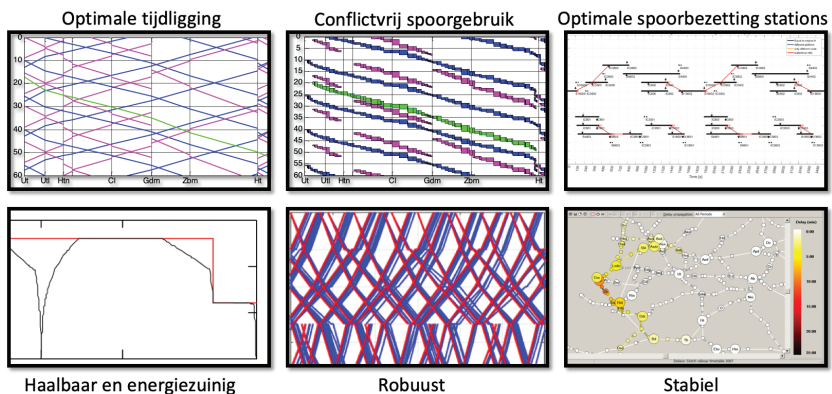
Een manier om het bestaande spoor beter te benutten is nauwkeuriger plannen in de orde van seconden in plaats van minuten. Op dit moment worden alle tijden afgerond naar hele minuten en zijn de opvolgtijden tussen treinen bij stations gebaseerd op normen in minuten. Daardoor zit er veel onbenutte tijd in de dienstregeling die veel beter ingezet kan worden. Dit vergt een microscopische planning van de dienstregeling waarbij gepland wordt op basis van het daadwerkelijke microscopische capaciteitsgebruik van de railinfrastructuur zoals dat in Zwitserland en Duitsland gebruikelijk is.



Figuur 7. Bloktijddiagram van het infrastructuurgebruik van Utrecht naar Eindhoven (Goverde e.a., 2016)

Dit maakt gebruik van de zogenoemde bloktijdtheorie waarmee de minimum opvolgtijden expliciet worden berekend. Deze hangen af van de treinbeveiliging. Figuur 7 illustreert dit met een bloktijddiagram van een basisuurpatroon. De blokjes geven de tijd weer dat een blok tussen twee seinen exclusief is gereserveerd voor een trein, van de zichtafstand voor een voorsein tot vrijgave van het blok. Het feit dat de bloktijdtrappen elkaar niet overlappen geeft aan dat de dienstregeling conflictvrij is.

ProRail heeft aangekondigd om de dienstregeling vanaf 2020 te plannen in tienden van minuten, oftewel 6 seconden, en NS heeft ook al proeven gedaan met een dienstregeling in tienden van minuten voor machinisten. Daarvoor zal het ontwerpproces moeten worden verfijnd en een balans moeten worden gevonden tussen aan de ene kant gedetailleerde planning van het infrastructuurgebruik en aan de andere kant optimalisatie van de vervoerdiensten op netwerkniveau. Hiervoor hebben we modellen ontwikkeld waar microscopische berekeningen voor rijtijden en bloktijden zijn ingebed in de macroscopische optimalisatie op netwerkniveau. De optimaliseringsmodellen krijgen daardoor meerdere lagen die iteratief op elkaar worden afgesteld en waarbij een optimale balans moet worden gevonden tussen meerdere doelen. In het Europese project ON-TIME (2014) is onder mijn leiding een methodiek voor de berekening van dienstregelingen ontwikkeld met drie lagen die meerdere prestatie indicatoren tegelijk optimaliseert: optimale tijddigging, conflictvrij spoorgebruik, optimale spoorbezetting stations, haalbaar en energiezuinig, robuust en stabiel (Figuur 8).



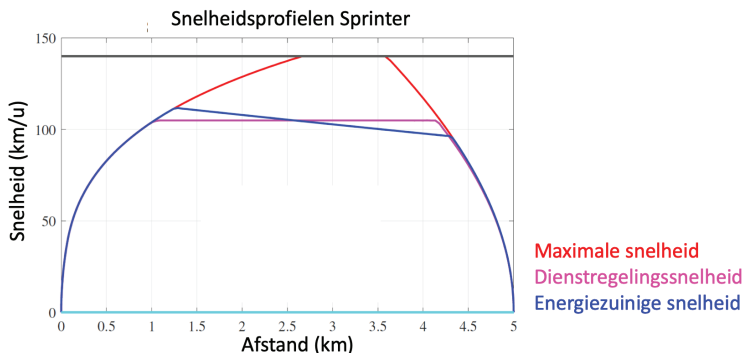
Figuur 8. Multi-criteria optimalisering van dienstregelingen

Het resultaat is een robuuste, conflictvrije, efficiënte en energiezuinige dienstregeling. Momenteel zijn we deze modellen verder aan het verfijnen om goede dienstregelingen te vinden tegen de grenzen van de infrastructuurbenutting. Ik werk ook samen met wetenschappers uit Beijing om methoden te ontwikkelen voor een betere capaciteitsbenutting van het Chinese hogesnelheidsnetwerk.

Automatische treinbesturing

Voor een machinist is de dienstregeling een lijst van aankomst- en vertrektijden op stations samen met doorkomsttijden op tussenliggende punten waar de trein niet stopt. De taak van een machinist is om op tijd te rijden onder de toegestane snelheidsgrenzen. Treinen kunnen dan soepel in- en uittakken, kruisen en achter elkaar rijden volgens het groene golf principe van conflictvrije treinpaden. De rijtijd tussen twee haltes bevat echter rijtijdspeling van minimaal 5%, en typisch 10% door het inpassen en afronden van de vertrek- en aankomsttijden. Om niet te vroeg aan te komen moet de snelheid dus ergens lager zijn dan de snelheidsgrenzen. Tot voor kort werd aan de ervaring van de machinist overgelaten om op tijd aan te komen. Maar dat betekent dat verschillende machinisten verschillende keuzes maken al naar gelang ervaring, rijstijl en materieelkarakteristieken, en daarbij ook inschattingfouten kunnen maken. Maar ook de dienstregeling kan verwarrend werken als over achtereenvolgende ritten verschillende rijtijdspelingen zijn gebruikt waardoor de rijstrategie afhangt van de specifieke rit. Dit is meer regel dan uitzondering als de dienstregeling in minuten is gegeven en de treinpaden zijn 'uitgebogen' om een op papier passende dienstregeling te vinden. Daarnaast suggereren tussenliggende doorkomsttijden in hele minuten ook verschillende snelheden over opeenvolgende deeltrajecten om niet te vroeg of te laat door een doorkomstpunt te rijden. Dit kan zelfs lijden tot onrealistisch lage snelheden op bepaalde stukken terwijl op andere stukken met maximale snelheid gereden moet worden. In de planning moet daarom een haalbaar snelheidsprofiel het uitgangspunt zijn voor het bepalen van de vertrek-, doorkomst-, en aankomsttijden. Dit vergt een uitbreiding van de bestaande planningssystemen die volledig op tijd gebaseerd zijn.

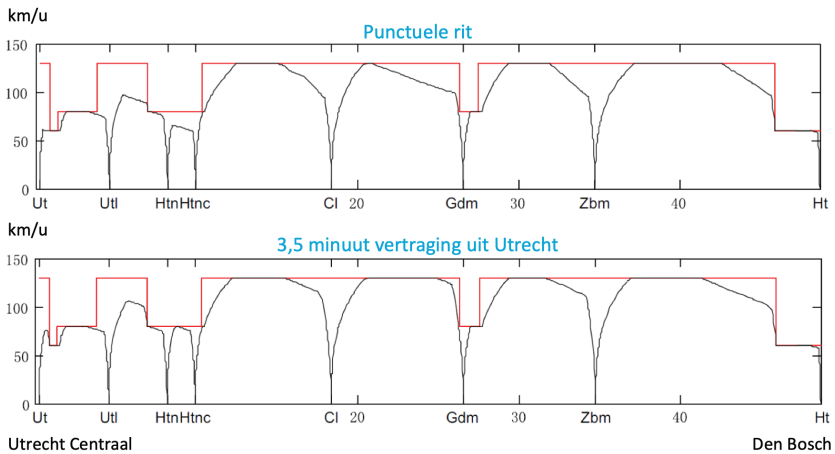
Een machinist kan verschillende rijstrategieën gebruiken (Figuur 9). Als er geen speling is dan moet de trein zo snel mogelijk accelereren, de maximale snelheden aanhouden en zo laat mogelijk remmen. Als er wel speling is kan de machinist bijvoorbeeld kiezen om een lagere kruissnelheid aan te houden zodanig dat de trein precies op tijd aankomt. Maar een trein kan ook gebruik maken van uitrollen: de tractie uitschakelen waardoor



Figuur 9. Snelheidswegdiagram voor verschillende rijstrategieën over 5 km voor een Sprinter (Scheepmaker e.a., 2019)

de trein langzaam snelheid mindert door de rol- en luchtweerstand. Vanwege de lage weerstand tussen het ijzeren wiel-rail contact is dit bij spoorwegen een zeer lucratieve manier om energie te besparen.

Energiezuinig rijden is een populair onderzoeksgebied waarbij de uitdaging is om de optimale kruissnelheid en uitrolpunten te bepalen. Dit zijn problemen die vallen onder optimale besturingstheorie. Voor korte afstanden is het optimaal om eenmalig maximaal te accelereren tot een optimale snelheid en dan beginnen met uitrollen, waarna aan het eind maximaal (met dienststremming) moet worden geremd om precies binnen de rijtijd aan te komen. Voor langere afstanden is het optimaal om maximaal op te trekken tot een optimale kruissnelheid en deze aan te houden tot het optimale uitrolmoment, waarna de trein uitrolt en op het laatst maximaal remt. Bij veel rijtijdspeling ligt de optimale kruissnelheid onder de maximale snelheid terwijl bij weinig speling de maximale snelheid moet worden aangehouden. Hierop zijn veel variaties waarbij rekening moet worden gehouden met materieelkarakteristieken, hellingen, tussenliggende snelheidsbeperkingen, comfort, operationele beperkingen, de seinen en de automatische treinbeïnvloeding, en de totale rijtijd (Figuur 10). Daarnaast kan modern materieel ook recuperatief remmen waarbij energie teruggewonnen wordt wat ook invloed heeft op de optimale energiezuinige rijstrategie. In de planning kunnen de energiezuinige snelheidsprofielen worden berekend voor gegeven vertrek- en aankomsttijden als basis voor de optimale doorkomsttijden en bloktijden in seconden. Deze berekeningen zijn verwerkt in onze dienstregelingsmodellen. We zijn deze methodiek verder aan het uitbreiden



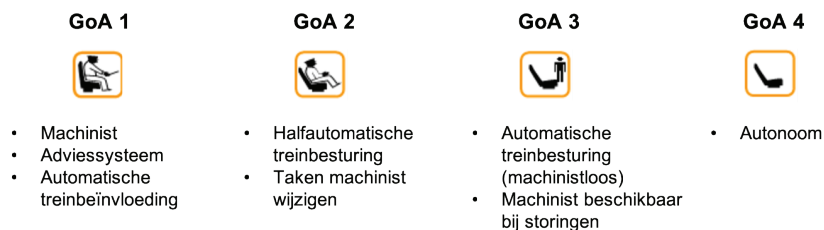
Figuur 10. Optimale snelheidsprofielen voor een Sprinter dienstregeling Utrecht-Den Bosch (Wang en Goverde, 2016)

om de rijtijdspeling optimaal te verdelen over meerdere opeenvolgende ritten in een corridor zodat het totale energiegebruik geminimaliseerd wordt.

Om beter op tijd te rijden kunnen machinisten worden ondersteund door adviessystemen, of Driver Advisory Systems (DAS) in het Engels. Een DAS geeft continu advies over het optimale rijgedrag zoals tot welke snelheid moet worden opgetrokken, welke snelheid moet worden aangehouden, en wanneer moet worden begonnen met uitrollen. Een verandering wordt tijdig aangegeven zodat de machinist voorbereid is. Als de machinist zich houdt aan de adviezen dan volgt de trein het optimale snelheidsprofiel en komt stipt aan op de geplande tijden met minimaal energiegebruik. Acceptatie van dergelijke systemen door de machinisten is essentieel voor een goed gebruik ervan. Belangrijk is daarom dat de adviezen betrouwbaar zijn en extra informatie gegeven wordt zodat de machinisten het nut ervan inzien. Bijvoorbeeld de verwachte afwijking op de volgende aankomsttijd als de machinist het advies volgt. Als de machinist het advies niet volgt of niet kan volgen door omstandigheden die het DAS niet weet, dan wordt de afwijking van het pad steeds groter en daarmee de beschikbare rijtijdspeling tot de volgende stop. Een DAS zal dan een nieuwe optimale rijstrategie berekenen zodat het advies up-to-date blijft.

Een DAS kan stand-alone zijn, dat wil zeggen dat het is gebaseerd op de dienstregeling en de vertraging van de trein. Het kan ook gekoppeld zijn aan

het verkeersleidingssysteem zodat updates van de dienstregeling kunnen worden doorgegeven. Maar een advies op basis van de dienstregeling kan alsnog leiden tot een onverwacht conflict met een andere trein als die vertraagd is. Op een druk spoornet moet het DAS daarom continu in verbinding staan met de verkeersleiding zodat nieuwe doorkomst- of aankomsttijden kunnen worden doorgegeven en verwerkt waarmee conflicten worden voorkomen en de trein niet alsnog onnodig moet remmen. Dergelijke systemen heten Connected DAS of C-DAS. Merk op dat het ook zonder DAS een goed idee is om de machinist te informeren over eventuele conflicten zodat hij/zij daarop kan participeren. In Nederland zijn machinist informatiesystemen door ProRail ontwikkeld onder de naam RouteLint maar dergelijke systemen ontbreken bij de meeste spoorwegen in het buitenland.



Figuur 11. Automatiseringsgraden (Grade of Automation) gebaseerd op NEN (2014)

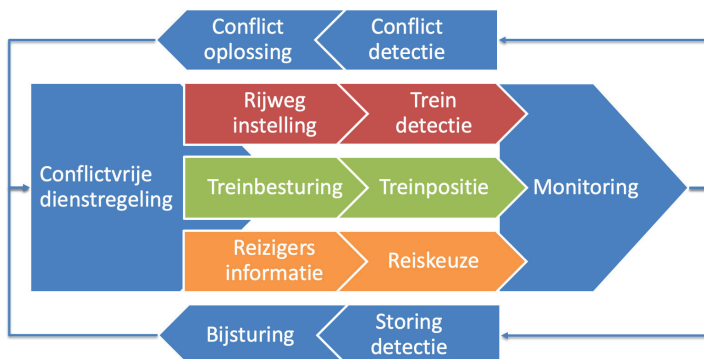
Een volgende stap is om de snelheidsprofielen direct te vertalen in tractie- en remopdrachten aan de tractie- en reminstallaties in de treinen. Hiermee kan de trein dan automatisch rijden zonder tussenkomst van de machinist. Dit staat bekend als automatische treinbesturing of Automatic Train Operation (ATO). Dit wordt al in veel metrosystemen gedaan. De taken van de machinist veranderen dan afhankelijk van de mate van automatisering. Er worden vier automatiseringsgraden (Grade of Automation) onderscheiden (Figuur 11): bij GoA 1 rijdt de machinist zelfstandig of ondersteund door een DAS. De automatisering zit dan met name in de automatische treinbeïnvloeding die continu de snelheid bewaakt en ingrijpt met een noodremming als de machinist een fout maakt. Bij GoA 2 geeft de machinist de opdracht aan de trein om te vertrekken waarna de trein dan automatisch naar de volgende stop rijdt. De machinist van een reizigerstrein is dan nog wel verantwoordelijk voor het veilig sluiten van de deuren, het vertrek, het controleren van het rijproces en de interactie met de omgeving. Uiteraard grijpt ook hier de automatische treinbeïnvloeding in als de automaat een fout maakt. Bij GoA 3 vertrekt en rijdt de trein automatisch en hoeft er geen machinist meer in de cabine te zijn. Er is wel nog iemand in de trein aanwezig die de besturing kan overnemen

in geval van storingen. De stap van GoA 2 naar GoA 3 is erg groot en vergt een groot vertrouwen in de algoritmen die de trein besturen. Uiteraard wordt de veiligheid hier ook gegarandeerd door de onderliggende automatische treinbeïnvloeding. GoA 4 is een volautomatische of autonoom rijdende trein die ook aangestuurd wordt vanuit de verkeersleiding bij storingen.

Automatisering is interessant waar de mens de beperkende factor is en taken door automatisering kunnen worden verbeterd zodat het veiliger, sneller, betrouwbaarder, nauwkeuriger, slimmer en goedkoper kan. ATO verbetert de capaciteit doordat treinen beter in hun pad blijven waardoor minder buffers nodig zijn en daarnaast kunnen ATO treinen dichter tegen de veiligheidsgrenzen rijden omdat de reactietijden sneller en voorspelbaarder zijn en geen marges ingebouwd hoeven te worden voor het opvangen van menselijke fouten. Ook kunnen deelprocessen verschillende automatiseringsgraden hebben. Bijvoorbeeld een GoA 2 automatische treinbesturing in knelpunten zoals op de Thameslink in Londen terwijl daarbuiten de machinist de besturing weer overneemt, of GoA 4 autonoom rijden tussen perrons en opstelterreinen. De uitdaging is wel dat een automaat alleen doet wat is geprogrammeerd. De onderliggende algoritmen moeten daarom flexibel zijn en alert reageren op sensorinformatie. Hier zal kunstmatige intelligentie een mogelijke rol gaan spelen zodat de ATO algoritmen continu leren van ervaring in allerlei omstandigheden en steeds beter presteren.

Intelligent railverkeersmanagement

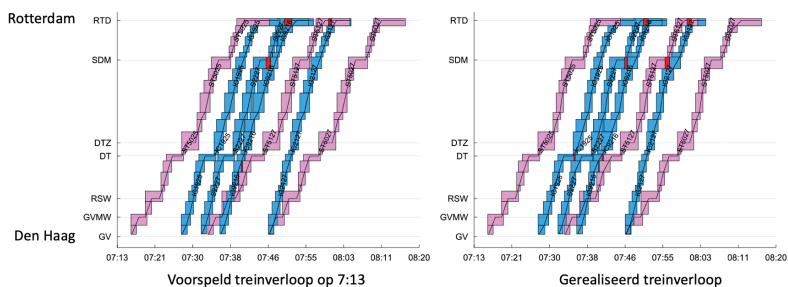
Een conflictvrije dienstregeling betekent dat de treinen rijden in een groene golf zonder conflicten met andere treinen. De dienstregeling is de basis van de rijweginstelling op stations, de treinbesturing in de trein, en de reizigersinformatie. In de praktijk wijken de treinen altijd iets af van het geplande tijdpad door bijvoorbeeld variaties in het rijgedrag van machinisten en in- en uitstaptijden van reizigers. Die afwijkingen kunnen soms ook zo groot zijn dat de rijtijdspeeling niet meer voldoende is waardoor vertragingen ontstaan. Bijvoorbeeld bij een te laat vertrek van een perron of bij tijdelijke snelheidsbeperkingen waardoor de rijtijd toeneemt. Een vertraagde trein kan een andere trein in de weg zitten waardoor deze moet afremmen en eventueel voor een rood sein moet wachten. Deze trein krijgt dan ook een vertraging maar bovendien bezet deze de infrastructuur ook langer waardoor het geplande infrastructuurgebruik ook niet meer klopt: de bloktijden worden ook langer. Bij druk spoorgebruik zorgt dit voor een domino-effect waardoor meer en meer treinen vertraagd raken. En dit kan vervolgens ook weer uitwerken op de logistieke planning van het rijdend personeel en de materieelomlopen waardoor nog meer treinen te laat vertrekken.



Figuur 12. Proactief railverkeersmanagement

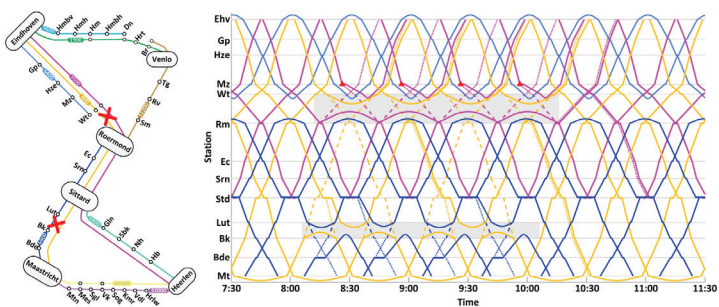
Railverkeersmanagement moet er voor zorgen dat vertragingen beperkt blijven of zelfs worden voorkomen. Belangrijk onderdeel daarbij is te zorgen dat de treinpaden conflictvrij blijven. Immers bij conflicten moeten treinen afremmen voor een rood sein, mogelijk wachten, en daarna weer opnieuw optrekken met negatieve impact op punctualiteit, capaciteitsgebruik, energiegebruik, en veiligheid. Dit laatste omdat ieder rood-sein nadering een potentieel risico van een roodseinpassage inhoudt. Hiervoor is een proactieve aanpak nodig om niet achter de feiten aan te lopen. Dit vergt een continu proces van monitoren van alle treinposities, voorspellen van de treinbewegingen en mogelijke conflicten, en vervolgens maatregelen nemen voor het voorkomen van de potentiële conflicten (Figuur 12). Die maatregelen kunnen een combinatie zijn van aangepaste tijden, treinvolgordes, of rijwegen en perronsporen in de stations. Deze conflictdetectie en -oplossing is weer een optimaliseringsprobleem waarbij de dienstregelingstijden en rijwegen worden aangepast zodat een bepaalde doelfunctie wordt geoptimaliseerd. Hierbij is een probleem dat het oplossen van het ene conflict door het verschuiven van tijden of rijwegen, op andere plekken weer nieuwe conflicten kunnen ontstaan die dan ook moeten worden opgelost. De optimaliseringsmodellen kijken daarom naar een groot gebied en zoeken naar een oplossing zodat weer een conflictvrije dienstregeling is gevonden. De doelfunctie is typisch het minimaliseren van de totale (trein of reizigers) vertraging, de maximale vertraging, het aantal vertraagde treinen, of de vertragingsoortplanting. Belangrijk is een snelle rekentijd zodat de maatregelen op tijd kunnen worden toegepast om de conflicten daadwerkelijk te voorkomen. De aangepaste tijden en rijwegen moeten vervolgens worden doorgegeven aan de treinen zodat machinist, C-DAS of ATO de rijstrategie kan aanpassen met nieuwe nevenvoorwaarden of doeltijden.

De wetenschap is volop bezig met de ontwikkeling van dit soort real-time optimaliseringsmodellen en algoritmen maar op een enkele uitzondering na worden ze nog niet in de praktijk toegepast. In de jaren negentig stond het ook op het wensenlijstje in Nederland bij de ontwikkeling van een nieuw proces- en verkeersleidingsstelsel, maar destijds waren de computers nog niet snel genoeg en was de conflictvoorspelling niet betrouwbaar te krijgen vanwege de grove monitoring van treinposities. Intussen worden treinposities veel nauwkeuriger gemonitord en zijn eerste stappen gezet voor de voorspelling van vertragingen en conflicten. In Zwitserland is al een landelijk werkend systeem van conflictdetectie, alhoewel verkeersleiders de conflicten nog wel handmatig moeten oplossen. Ik heb veel onderzoek gedaan naar het voorspellen van rijtijden, conflicten en verwachte aankomsten op basis van treindetectiedata. Een voorspellend model gebaseerd op machine learning en optimalisering geeft nauwkeurige resultaten voor een voorspellingshorizon van een half uur (Figuur 13). Rijtijden zijn heel nauwkeurig te voorspellen. Halteertijden daarentegen zijn veel minder voorspelbaar met een grote variatie in het halteerproces. Dit waren de eerste Big Data projecten bij het spoor. Intussen is de tijd rijp voor het toepassen van dit soort technieken. In het Europese project ON-TIME hebben we meegewerkt aan een werkend prototype met alle componenten van monitoring, conflictdetectie en -oplossing, en de verwerking daarvan in een real-time conflictvrij verkeersplan voor het aansturen van de rijweginstelling en C-DAS van de treinen. Dergelijke Traffic Management Systemen zijn nu in ontwikkeling voor o.a. het Verenigd Koninkrijk, Zwitserland en Denemarken.



Figuur 13. Voorspeld en gerealiseerd infrastructuurgebruik en conflicten (rode blokken) op basis van treindetectiedata (Kecman en Goverde, 2015)

Naast het voorkomen en beperken van vertragingen zijn er ook verstoringen door bijvoorbeeld defecte treinen, aanrijdingen, sein-, wissel- en treindetectie-storingen, en incidenten op overwegen. In dit geval is een stuk spoor of een deel van een station gestremd waardoor daar geen treinen meer kunnen rijden. Dit vergt bijsturing van de dienstregeling, het treinmaterieel, het rijdend personeel, en omleiden van goederentreinen. Dit is weer een uitdagend optimaliseringsprobleem waar treinen voortijdig moeten keren op stations aan beide kanten van de versperring waarbij ook de perronspooropstelling en de routeringen door de stations veranderen (Figuur 14). Typische doelfuncties zijn hier om zoveel mogelijk treinen te laten rijden en de vertragingen zoveel mogelijk te beperken tot direct rond het versperde gebied. Ook hier werk ik met diverse promovendi aan. Belangrijk is een snelle reactie op informatie over een versperring waarna zo snel mogelijk een nieuw aangepast plan in werking treedt zodat treinen niet stranden voor de versperring. Extra complicerend zijn meerdere versperringen die elkaar beïnvloeden. Ook de transitie terug naar de normale dienstregeling na herstel van de storing is een hele uitdaging omdat materieel en personeel behoorlijk verstoord kunnen zijn geraakt. De onzekerheid over het einde van de storing is nog een extra uitdaging wat leidt tot een stochastisch optimaliseringsprobleem. Er is nu ook een grote impact voor de reizigers die deels moeten omrijden of met vervangende bussen moeten worden vervoerd. Adequate reizigersinformatie kan dan ook veel leed verzachten. De doelfunctie moet daarom reizigers georiënteerd zijn door minimalisering van gewogen reistijden inclusief aantal overstappen en extra wachten omdat een trein vol is. Hierbij zouden treinen dan ook extra kunnen stoppen of juist haltes overslaan. Dit vergt dan wel een reizigerstoedelingsmodel om de impact op de reizigers te berekenen wat de rekestijd vooralsnog enorm doet toenemen. Hier is nog meer onderzoek nodig om snel optimale beslissingen te kunnen berekenen.



Figuur 14. Verstoringsmanagement met optimale keringen en extra haltes (rode driehoeken) bij twee versperringen tussen Eindhoven en Maastricht (Zhu en Goverde, 2019)

Digitale treinbeveiliging

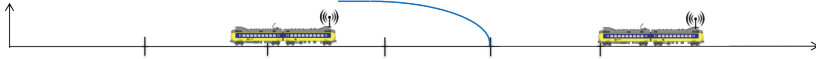
Veiligheid is de belangrijkste eis aan spoorvervoer. Een trein wordt geleid door het spoor en het ijzeren wiel-rail contact zorgt voor een zeer lage weerstand waardoor de remwegen zeer lang zijn en over het algemeen langer dan de zichtafstand. Railverkeer kent daardoor twee potentiële gevaren: ontsporingen en botsingen. Het beveiligingssysteem heeft als doel om de veiligheidsrisico's door menselijke fouten te voorkomen en bestaat daarom uit automatische systemen, zoals spoorvrijdetectie, automatische blokstelsels op spoorlijnen, rijwegbeveiliging op knooppunten, overwegbeveiliging, en automatische treinbeïnvloeding in de trein. Op knooppunten wordt de veiligheid gegarandeerd door eisen te stellen aan de rijweg tussen twee seinen: een rijweg wordt ingesteld door een treindienstleider of een automatische rijweginstelling vanuit seinhuizen of verkeersleidingsposten. De rijwegbeveiliging checkt of alle secties en wissels van de rijweg vrij zijn en niet zijn geblokkeerd voor een andere rijweg, dan worden de wissels in de goede positie gezet en vergrendeld, en daarna kan het sein dat toegang geeft tot de rijweg vrij komen, terwijl andere seinen die toegang geven tot de rijweg worden geblokkeerd zodat die op rood blijven totdat de rijweg weer wordt vrijgegeven. Op de vrije baan tussen stations wordt gebruik gemaakt van een automatisch blokstelsel waar de blokseinen automatisch reageren op passerende treinen via spoorvrijdetectie. De seinbeelden achter een trein zorgen er dan voor dat een volgende trein op veilige afstand volgt. Tenslotte bewaakt de automatische treinbeïnvloeding dat de opdrachten van de seinen worden opgevolgd en grijpt zo nodig in met een noodremming als de toegestane snelheid wordt overschreden. De beveiliging bewaakt dus dat treinen op veilige afstand van elkaar rijden en dat rijwegen veilig liggen als een trein nadert.

De capaciteit van het spoor wordt in hoge mate bepaald door de efficiëntie van de beveiligingssystemen. De precieze invulling daarvan bepaalt uiteindelijk hoe dicht treinen elkaar kunnen volgen en met welke snelheden (Figuur 15). Een van de manieren om de capaciteit te verbeteren is daarom over te stappen op een efficiëntere beveiliging. In Nederland maken we op het hoofdnets gebruik van het NS'54 vaste blokstelsel en het ATB treinbeïnvloedingssysteem. Het spoor is hierbij opgedeeld in blokken, waarin maar één trein tegelijk mag zitten. Een trein moet actief een rijtoestemming krijgen om een blok in te rijden via seinen. Een veel gebruikt seinstelsel is het vaste blokstelsel met drie seinbeelden: rood, geel en groen. De seinen staan dan minimaal op remwegafstand van elkaar. Een (voor)sein staat op geel als het daaropvolgende sein rood is en de trein dus moet remmen. Het is groen als de voorgaande trein minimaal twee blokken verder is.

- Huidig vast bloksysteem



- Vast blok met ERTMS Level 2



- Bewegend blok (ERTMS Level 3)



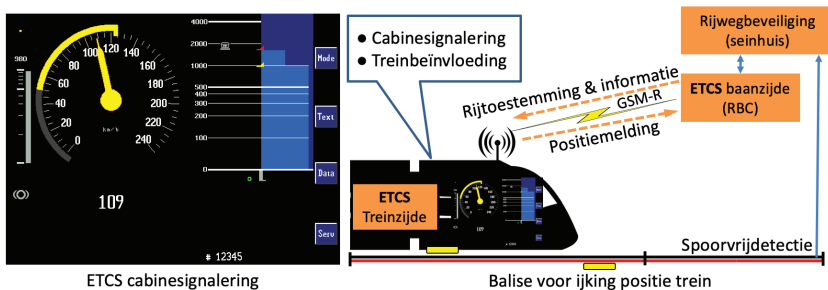
Figuur 15. Blokbeveiligingen op spoorlijnen met afnemende infrastructuurapparatuur en toenemende autonomie van de trein

Bij de kortst mogelijke treinopvolging springt het sein voor de tweede trein net van geel op groen zodat de machinist niet hoeft te remmen. Hierbij wordt ook nog een marge aangehouden waarin de machinist kan reageren als een sein op geel staat en eventueel de automatische treinbeïnvloeding kan ingrijpen als geen reactie volgt. Bij een baanvakssnelheid van 140 km/u geldt een remweg van 1150 m en blokken hebben dan een lengte van 1500 m inclusief een marge voor het ingrijpen van de automatische treinbeïnvloeding. Uitgaande van een zicht- en reactieafstand van 300 m en een maximale treinlengte van 300 m is de minimale afstand tussen de kop van twee treinen dan gelijk aan 3600 m. Als de treinen op maximale snelheid rijden dan komt dit overeen met een minimum opvolgtijd van anderhalve minuut. Bij 110 km/u is dat twee minuten. Op stations komt daar ook nog de insteltijd bij voor het omzetten en vrijgeven van wissels en daarnaast neemt hier de rijtijd toe als de trein afremt, een tijdje stilstaat en vervolgens weer optrekt. De minimum opvolgtijd is dan al snel drie minuten. De minimum opvolgtijd tussen twee treinen op een spoorlijn wordt uiteindelijk bepaald door het kritieke blok met de kortste tijdsduur tussen de vrijgavetijd van de eerste trein en de insteltijd voor de volgende trein. Dit kritieke blok is meestal vlak voor of na een station, of bij een halte op een spoorlijn. Het NS'54 blokstelsel is ingevoerd vanaf 1955 en het ATB treinbeïnvloedingssysteem vanaf 1970. Deze systemen zijn gebaseerd op relaistechiek en hebben lang voldaan, maar na vijftig jaar lopen we tegen de grenzen aan en is er behoefte aan een moderne digitale beveiliging waarmee treinen elkaar veilig sneller en korter kunnen volgen.

Ieder land heeft zijn eigen beveiligingssysteem ontwikkeld wat internationaal treinvervoer bemoeilijkt, met name een trans-Europees netwerk voor goederenvervoer en een Europees hogesnelheidsnetwerk. Daarom

heeft de Europese Unie in de jaren negentig het initiatief genomen voor de ontwikkeling van technische specificaties voor interoperabiliteit voor besturing en seingeving, genaamd ERTMS, wat staat voor European Rail Traffic Management System. De bedoeling is dat dit bijdraagt aan één samenhangend Europees spoorstelsel, waarbij treinen op het spoor in heel Europa kunnen rijden ongeacht de leveranciers van de boord- en infrastructuurapparatuur. De eerste ERTMS specificatie kwam uit in 2000, gevolgd door een tweede versie in 2005 en een derde in 2012.

ERTMS bevat momenteel twee onderdelen: het radiocommunicatiesysteem GSM-R en het geïntegreerde cabinesignalerings- en treinbeïnvloedingssysteem ETCS, het European Train Control System. De baanapparatuur van ETCS krijgt rijtoestemmingen van de rijwegbeveiliging en geeft deze draadloos door aan de ETCS boordcomputer. Op basis van de rijtoestemming en de eigen remeigenschappen berekent de boordcomputer het maximum snelheidsprofiel tot aan het einde van de rijtoestemming. Deze informatie wordt geïntegreerd in de snelheidsklok aan de machinist getoond. De seinen langs de baan zijn dus vervangen door cabinesignalering. De boordcomputer bewaakt ook de snelheid en grijpt zo nodig in met een noodremming (Figuur 16).



Figuur 16. ERTMS Level 2 met cabinesignalering en GSM-R radiocommunicatie tussen trein en baan

ERTMS heeft een aantal toepassingsniveaus of levels, die verschillen in de datacommunicatie tussen baanapparatuur en de boordapparatuur. ERTMS Level 1 krijgt de rijtoestemming via balises (bakens) in het spoor. ERTMS Level 2 krijgt de rijtoestemming via GSM-R en meldt de treinpositie terug aan de baanapparatuur zodat die een overzicht heeft waar alle treinen zijn. De rijwegbeveiliging heeft nog wel spoorvrijdetectie uit de baan nodig om er zeker van zijn dat het spoor vrij is. In ERTMS Level 3 meldt de trein de hele spoorbezetting met een garantie van de treinintegriteit, dat wil zeggen dat de trein volledig is, zodat de rijwegbeveiliging geen aparte

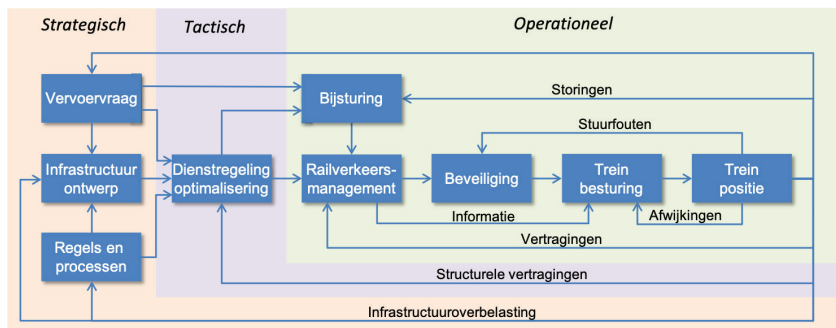
spoorvrijdetectie in de baan meer nodig heeft. Dit maakt het mogelijk om van vaste blokken over te gaan op bewegende blokken waarbij de volgende trein een rijtoestemming kan krijgen tot vlak achter de voorganger en die rijtoestemming beweegt mee met de voorganger. Het principe blijft hierbij nog steeds dat een trein met een absolute remwegafstand achter de voorganger blijft rijden zodat als die opeens ontspoord de trein nog op tijd kan remmen. Een stap verder gaat het concept van virtuele koppeling van treinen waarbij een trein tot vlak achter de voorganger kan naderen en als een konvooi gezamenlijk verder rijden. Hiervoor is directe trein-trein communicatie nodig zodat de volgende treinen direct reageren op een snelheidsaanpassing van de leidende trein. Dit soort concepten waren tot voor kort ondenkbaar in de spoorwereld maar de ontwikkelingen in digitale techniek en communicatie gaan snel. In het Europese project MOVINGRAIL binnen het EU programma Shift2Rail wordt onder mijn coördinatie de haalbaarheid van deze trein-centrische technologie onderzocht als ultieme stap naar intelligente treinen. Het mag duidelijk zijn dat deze ontwikkelingen alleen mogelijk zijn bij een volledig automatische treinbesturing.

Nederland was er vroeg bij met twee ERTMS proeftrajecten in 2002. In 2007 werden de HSL-Zuid voor hogesnelheidstreinen en de Betuweroute voor goederentreinen opgeleverd. In 2011 volgde Amsterdam-Utrecht, en in 2012 de Hanzelijn tussen Lelystad en Zwolle, allen met ERTMS Level 2. Daarnaast ligt voor goederentreinen op de Havenlijn en rangeerterrein Kijfhoek ERTMS Level 1.

Integrale systeemaanpak

De verschillende componenten van een railverkeerssysteem vormen een samenhangend geheel en zorgen gezamenlijk voor de prestaties van het gehele systeem (Figuur 17). De dienstregeling is de basis van het railverkeersmanagement. Het railverkeersmanagement zorgt voor een tijdige instelling van de rijwegen waardoor de rijwegbeveiliging wordt aangestuurd, en rijtoestemmingen worden gegeven door seinen en verwerkt in de automatische treinbeïnvloeding. Informatie over eventuele aanpassingen moeten ook naar de treinen worden gestuurd zodat deze op de hoogte zijn. De treinbesturing reageert op de rijtoestemmingen en afwijkingen van de treinbewegingen ten opzichte van het plan. De treinbesturing kan gedaan worden door een machinist of een automaat. Bij stuurfouten waarbij de veiligheidsgrenzen worden overtreden, zoals te snel rijden of te laat remmen, grijpt de beveiliging in met een noodremming van de automatische treinbeïnvloeding. Bij vertragingen reageert de conflictdetectie en –oplossing

van het railverkeersmanagementsysteem met een planaanpassing. Bij storingen wordt de bijsturing aangeroepen waarna een nieuwe dienstregeling het uitgangspunt vormt van het railverkeersmanagement. Structurele vertragingen worden geanalyseerd en zullen leiden in een aanpassing van de dienstregeling of tot een overbelastingverklaring als blijkt dat de problemen niet kunnen worden opgelost in de dienstregeling. Dat kan leiden tot het aanpassen van de processen, regels of de infrastructuur. Als laatste, maar zeker niet onbelangrijkste, zullen de prestaties invloed uitoefenen op de vervoervraag. Met name kunnen slechte prestaties leiden tot ontevreden reizigers die mogelijk de overstap maken naar andere vervoerwijzen.



Figuur 17. Samenhang in het railverkeerssysteem

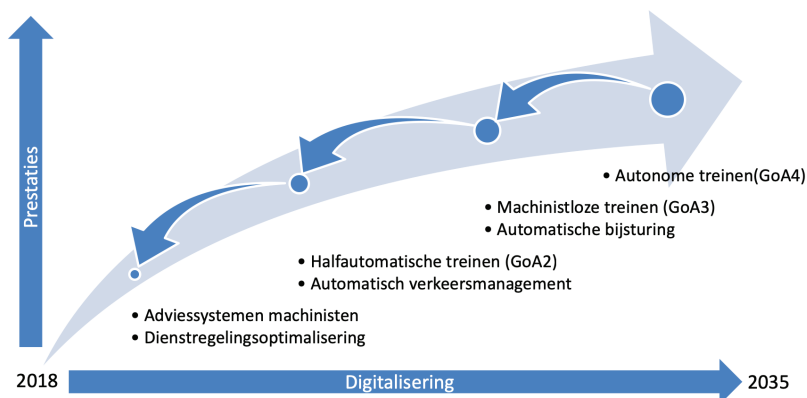
Ik heb nu een aantal innovaties geschetst die met moderne digitale technologie gerealiseerd kunnen worden. Deze innovaties zijn nog niet in de praktijk gebracht op automatische metrosystemen en enkele kleinschalige uitzonderingen na. Inderdaad is nog veel onderzoek nodig waar ik mijn steentje aan wil bijdragen. Essentieel hierbij is dat een optimale benutting van het spoor een integrale systeemaanpak vergt van dienstregelingsplanning, railverkeersmanagement, automatische treinbesturing en digitale beveiliging om een efficiënt, betrouwbaar en veilig spoorvervoer te garanderen (Figuur 18).

Het is een goed gebruik om bij een intreerede vijf jaar vooruit te kijken. De geschiedenis van het complexe spoorsysteem leert echter dat een visie voor vijf jaar weinig teweeg zal brengen. Ik leg daarom het punt op de horizon bij de realisering van autonome treinen in 2035 en kijk van daaruit terug hoe dat punt te bereiken is (Figuur 19). Het jaar 2035 is (vooralsnog) ook mijn pensioenleeftijd dus voor die tijd moet ik het doen.



Figuur 18. Integrale systeemaanpak voor optimale benutting van het spoor

Het meeste onderzoek is gedaan op het gebied van dienstregelings-optimalisering en dat wacht in feite op implementatie. De grootste uitdaging is goede invoerdata van met name de spoorinfrastructuur. Essentieel voor een stap voorwaarts is daarom een gevalideerde, toegankelijke en goed beheerde infrastructuurdatabase op microscopisch niveau. Dit is onderdeel van de digitalisering van het spoor en vormt alleen al een uitdaging in alle landen. Het tweede onderdeel dat onder bereik ligt zijn adviessystemen voor machinisten. Ook hier moet de configuratiedata in orde zijn. Als deze twee uitdagingen zijn overwonnen is automatisch railverkeersmanagement de volgende stap, inclusief de interactie met de gekoppelde adviessystemen in de treinen. De snelheidsadviezen kunnen nu ook direct aan de tractie- en reminstallaties worden gekoppeld zodat automatische treinbesturing mogelijk wordt waarbij de interactie met de machinist wel essentieel is. De volgende stap is machinistloos rijden op commerciële treindiensten, en ook de vergaande automatisering van de bijsturing bij storingen zodat de dienstregeling snel kan worden aangepast bij versperringen. Na deze overwinningen komen autonome treinen binnen bereik. Bij al deze ontwikkelingen moet niet direct worden gedacht aan landelijke implementaties maar aan inzet daar waar dat nodig is, waardoor innovaties ook eerder op kleine schaal haalbaar zijn. Op de Thameslink in Londen wordt in 2019 bijvoorbeeld halfautomatisch rijden (GoA 2) in combinatie met ERTMS Level 2 ingevoerd om 24 treinen per uur per richting mogelijk te maken. Dit zal later worden omgezet naar volautomatisch rijden. Buiten deze flessenhals



Figuur 19. Innovaties in het railverkeerssysteem tot 2035

nemen de machinisten de besturing weer over. Een ander voorbeeld van autonoom rijden is automatisch keren of autonoom rijden op een opstelterrein.

In dit plaatje is de ontwikkeling van automatische treinbesturing een bottom-up proces met centralisatie in dienst van de onderliggende processen. De treinbesturing moet een zelf-organiserend veerkrachtig deelsysteem zijn met de daarboven liggende verkeersmanagementlaag in dienst van deze onderliggende laag. Zo kan de treinbesturing beter presteren waarbij de interactie tussen de treinen via de daarboven liggende verkeersmanagementlaag wordt ondersteund. Bij virtuele koppeling zijn de virtueel gekoppelde treinen gezamenlijk een deelsysteem die als konvooi wordt ondersteund door de verkeersmanagementlaag. Daarbij is de menselijke factor ook zeer relevant. Waar is de mens goed in en waar de computer? Computers zijn nauwkeuriger in routineklussen, maar hoe hou je de mens betrokken in het proces om in te grijpen wanneer dat nodig is? Hou kan je de creativiteit van de mens ondersteunen in bijvoorbeeld de bijsturing waar onzekerheid een grote rol speelt? De idee van automatisering is hier meer om slimmer te werken in plaats van harder. De computer-mens interactie is een essentieel onderdeel voor het succes van automatisering. Daarbij is het ontwerp van automatische systemen ook mensenwerk.

Voor al deze ontwikkelingen op het gebied van verkeersmanagement en automatische treinbesturing is een efficiënt communicatie- en beveiligingssysteem essentieel. Dat wil zeggen minimaal ERTMS Level 2



Figuur 20. ERTMS migratieplan tot 2030 (ERTMS Programma, 2018)

zodat (semi-) continue communicatie mogelijk is tussen de boordcomputers in de trein en het verkeersmanagementsysteem. Op dit moment worden ook specificaties voor automatische treinbesturing ontwikkeld binnen ERTMS, zodat automatische treinbesturing mogelijk wordt in samenhang met ETCS. Deze afstemming vormt nog wel een uitdaging. Figuur 20 toont de spoorlijnen die in 2030 voorzien zullen zijn van ERTMS Level 2 volgens de huidige plannen in Nederland, met in zwart de huidige status sinds 2012 (ERTMS Programma, 2018). Vergelijking van Figuur 19 en 20 illustreert dat deze ERTMS migratieplannen op gespannen voet staan met de ambities omtrent automatische treinbesturing. In 2012 besloot de regering om het Nederlandse spoorweginet versneld uit te gaan rusten met ERTMS naar aanleiding van het 'Parlementair onderzoek onderhoud en innovatie spoor' van de Commissie Kuiken waar ik als externe onderzoeker aan heb meegewerkt (Goverde e.a., 2012). Ten tijde van dat onderzoek en de daarop gebaseerde beslissing was automatische treinbesturing op hoofdspoor nog toekomstmuziek en niet eens meegenomen. Dat is intussen heel anders met de geslaagde proeven in commerciële dienst van ATO over ETCS op de Thameslink in

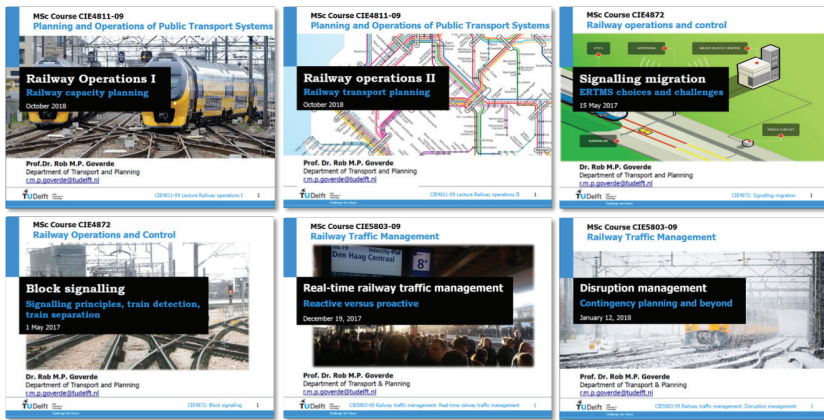
het Verenigd Koninkrijk in maart 2018 en de geplande inbedrijfstelling in december 2019, en in Nederland een geslaagde proef met goederentreinen op de Betuweroute in 2018 en een geplande proef met persontrentreinen in de provincie Groningen met Arriva in 2019 (ProRail, 2017). Deze ontwikkelingen geven een extra impuls aan een voorspoedige migratie van ERTMS op het Nederlandse spoor. Volgens de plannen zijn alle NS treinen vanaf 2023 voorzien van ERTMS, maar dit kan dus alleen worden verzilverd op de spoorlijnen waar ook ERTMS ligt. Ook worden in de plannen grote stations als Utrecht Centraal en Amsterdam Centraal vooralsnog overgeslagen zodat treinen daar moeten terugschakelen naar ATB (ERTMS Programma, 2018). Stations zijn echter juist de capaciteitsknelpunten waar treinen bij elkaar komen en transitie zijn hier ongewenst. Dit vormt nog een extra uitdaging.

Het ERTMS Programma richt zich op de vervanging van de huidige seingeving en ATB door ERTMS Level 2. Maar het staat daarmee los van de ontwikkelingen rondom treinbesturing en railverkeersmanagement. Daarmee is het integrale systeemperspectief verdwenen: ERTMS is onderdeel van de digitalisering van het railverkeerssysteem om betere prestaties mogelijk te maken. Als ERTMS wordt ingevoerd puur als vervanging van de huidige seingeving en treinbeïnvloeding dan wordt het spoor veiliger maar niet efficiënter. De kansen die ERTMS biedt op het gebied van betere besturing zijn bedrijfsmatig essentieel voor een effectieve aanpak van betere capaciteitsbenutting, punctualiteit, energiebesparing, en betrouwbaar vervoer (Goverde e.a., 2012). De treinen zijn vanaf 2023 met ERTMS voorzien en dat zou dan ook zo snel mogelijk ingebed moeten kunnen worden in een integrale architectuur voor automatische treinbesturing en verkeersmanagement. Daarmee kan daadwerkelijk een digitale systeemsprong gemaakt worden. Een integrale benadering van beveiliging en besturing is daarom nog steeds de grootste uitdaging voor de spoorsector om op een effectieve manier veilig en efficiënt treinverkeer te verwezenlijken.

Visie op onderwijs

De Nederlandse spoorsector heeft een tekort aan ingenieurs op het gebied van railsystemen. De Nederlandse onderwijsinstellingen hebben daarom de verantwoordelijkheid om studenten aan te trekken en goede mensen op te leiden om de uitdagingen op het spoor in goede banen te leiden. In Nederland bestaat geen gespecialiseerde Master op spoorweggebied. Aan de TU Delft hebben we wel het Masterprogramma Transport & Planning binnen Civiele Techniek en het multidisciplinaire Masterprogramma Transport, Infrastructuur en Logistiek (TIL). Deze bredere transport programma's hebben weer

specialisaties in Openbaar Vervoer en Railverkeerssystemen. Hierin ben ik verantwoordelijk voor twee railverkeersvakken en draag ik bij aan een derde vak over openbaar vervoer, inclusief railvervoer (Figuur 21). Daarnaast maak ik me sterk voor railcomponenten in andere vakken, zoals het vak Transport Safety waar de veiligheid van verschillende vervoerwijze wordt behandeld (spoor, weg, water, lucht). Een andere belangrijke taak is het aantrekken en begeleiden van studenten die willen afstuderen op een railonderwerp.



Figuur 21. Selectie onderwerpen uit het railonderwijs aan de TU Delft

Naast het onderwijs en onderzoek rondom railverkeer- en vervoer, wordt aan de TU Delft ook onderwijs en onderzoek verricht op het gebied van railbouwkunde. Vanuit de gedachte dat behoefte is aan spoorwegingenieurs met integrale kennis van railsystemen, heb ik samen met prof. Rolf Dollevoet van Railbouwkunde de afgelopen jaren een Annotatie Railsystemen opgezet waarin studenten een samenhangend pakket van vijf á zes railvakken kunnen kiezen uit een lijst van tien railvakken en daarnaast afstuderen in een railonderwerp. Het vakkenpakket bevat een mix van railverkeerskunde en railbouwkunde, zodat studenten een brede basis krijgen. Hiervoor hebben we de laatste jaren het aanbod aan railvakken flink uitgebreid. Daarmee krijgen studenten in totaal een jaar aan railonderwijs, ingebed in een bredere Master zoals TIL of de Civiele Techniek richtingen Transport & Planning en Structural Engineering. Intussen zijn zeven studenten afgestudeerd met de annotatie Railsystemen.

In de colleges gebruik ik materiaal uit onderzoek waardoor de studenten op de hoogte zijn van de laatste ontwikkelingen. Mijn studenten studeren af bij diverse bedrijven over de hele spoorsector. In totaal heb ik intussen

44 afstudeerstudenten begeleid die nu bijna allemaal in de railsector werken. Ik hoop nog veel meer studenten af te leveren en daarmee mijn bijdrage te leveren aan de spoorkennis en innovatie in Nederland.

Dankwoord

Als eerste wil ik prof. Ingo Hansen bedanken. Hij heeft me geïntroduceerd in het vakgebied en me met mijn wiskundige achtergrond vrijgelaten om er een eigen draai aan te geven. Dit is de kiem geweest van wat tegenwoordig bekend staat als Railway Operations Research. Ik wil prof. Serge Hoogendoorn en prof. Bart van Arem bedanken voor hun geloof in mij en een hoogleraarspositie in railverkeer binnen de afdeling Transport en Planning. Ik wil alle promovendi, postdocs en andere onderzoekers bedanken die met mij dit vakgebied verder hebben ontwikkeld. Ik wil alle collega's, lokaal, nationaal en internationaal, bedanken voor de verbreding en verdieping. Ik wil mijn ouders bedanken voor hun onvoorwaardelijke steun in het vinden van mijn eigen pad. Ik wil al mijn vrienden, schoonouders en de rest van mijn familie bedanken voor de noodzakelijke sociale afleiding en me te nemen zoals ik ben. Ik wil mijn vrouw Marie Therese bedanken voor haar geduld in tijden met deadlines, haar steun in moeilijke tijden, en de mooie momenten die we samen delen. Als laatste wil ik de anonieme donor van mijn longen bedanken, zonder wie ik hier nu niet zou hebben gestaan.

Ik heb gezegd.

Referenties

ERTMS Programma (2018). *Negende voortgangsrapportage programma ERTMS*. Rapportageperiode 1 januari 2018 – 30 juni 2018, Utrecht.

Goverde, R.M.P., Bešinović, N., Binder, A., Cacchiani, V., Quaglietta, E., Roberti, R., Toth, P. (2016). A three-level framework for performance-based railway timetabling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 67, 62-83.

Goverde, R.M.P., Hansen, I.A., Corman, F., D'Ariano, A., Trinckauf, J. (2012). *Parlementair onderzoek onderhoud en innovatie spoor. Deelonderzoek I: Innovatie op het spoor en mogelijkheden van ERTMS in Nederland*. Tweede Kamer der Staten-Generaal, Vergaderjaar 2011-2012, kamerstuk 32707, nr. 11.

Kecman, P., Goverde, R.M.P. (2015). Online data-driven adaptive prediction of train event times. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(1), 465-474.

KiM (2018). *Kerncijfers Mobiliteit 2018*. Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Den Haag.

NEN (2014). *NEN-EN-IEC 62290-1:2014. Spoorwegen en soortgelijk geleid vervoer - Transport- en verkeersleidingssystemen voor automatisch geleid stedelijk vervoer - Deel 1: Uitgangspunten voor de systemen en basiseisen*.

Scheepmaker, G.M., Willeboordse, H.Y., Hoogenraad, J.H., Luijt, R.S., Goverde, R.M.P. (2019). Comparing train driving strategies on multiple key performance indicators. *Journal of Rail Transport Planning and Management*, ingediend.

NS (2017). *Jaarverslag 2017*. Nederlandse Spoorwegen, Utrecht.

ON-TIME (2014). <http://www.ontime-project.eu/>

ProRail (2017). *Jaarverslag 2017*. ProRail, Utrecht.

Wang, P., Goverde, R.M.P. (2016). Multiple-phase train trajectory optimization with signalling and operational constraints. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 69, 255-275.

Zhu, Y., Goverde, R.M.P. (2018). Dynamic timetable rescheduling for multiple connected disruptions. In progress. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, ingediend.

