

Energiezuinig rijden van treinen om op tijd te rijden

Roel G. van Huet – Royal HaskoningDHV, afdeling Rail – roel.van.huet@rhdhv.com

Gerben M. Scheepmaker – NS Reizigers, afdeling Prestatieregie en Innovatie –
gerben.scheepmaker@ns.nl

Ralph S. Luijt – NS Reizigers, afdeling Asset Strategie – ralph.luijt@ns.nl

Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 23 en 24 november 2017, Gent

Samenvatting

De kerntaak van NS (Nederlandse Spoorwegen) is om reizigers te vervoeren. Daarvoor is het belangrijk om op tijd te rijden op basis van een goede dienstregeling. Het doel is om een dienstregeling te ontwerpen die robuust is en daardoor tegen kleine verstoringen bestand is. Sturing en analyse hiervan vindt plaats binnen het gezamenlijke ProRail-NS programma Op Tijd Reizen (OTR), waarbij de nadruk ligt op secondeniveau precies op tijd aankomen.

De rijtijdspeling is de sleutel voor OTR. Om een dienstregeling robuust te maken wordt deze extra rijtijd aan de technisch minimale rijtijd toegevoegd. Die extra tijd in de dienstregeling geeft een zekere vrijheid voor de machinist, met als gevolg dat aankomsttijden uiteenlopen. Door deze spreiding in tijd is de kans op onderlinge hinder groter. Om de doelstellingen van het Programma Hoogfrequent Spoorvervoer (PHS) te kunnen behalen is spreidingsreductie voorwaardelijk. Om de rijtijdspeling zo goed mogelijk te gebruiken en spreiding te reduceren past NS als middel energiezuinig rijden (EZR) toe. Het doel van EZR is om exact op de geplande aankomsttijd het volgende station binnen te rijden: niet te laat maar zeker ook niet te vroeg. Een trein kan door de lage rolweerstand en de hoge massa met EZR substantieel energie besparen door uit te rollen (uitgeschakelde tractie).

Het doel van deze paper is om aan de hand van een casestudy aan te tonen wat de netwerkeffecten zijn van een energiebesparende rijstrategie voor OTR, voor de veiligheid en voor het energieverbruik. Om dit te toetsen is gebruik gemaakt van het simulatieprogramma OpenTrack om het effect van de verschillende rijstrategieën te evalueren. Daarbij is specifiek gekeken naar de toetsingscriteria OTR, conflicten en veiligheid en het energieverbruik.

De resultaten laten zien dat EZR op netwerkniveau bevorderlijk is voor OTR, omdat er meer aankomsten op tijd plaatsvinden en de spreiding van de aankomsttijden afneemt. Daarnaast vermindert de toepassing van EZR het aantal geelseinpassages en roodseinnaderingen, doordat er een daling is in het aantal conflicten in het treinverkeer. Tot slot leidt EZR tot een significante daling in het energieverbruik van minimaal 10%. Dit gaat op landelijke schaal om miljoenen euro's per jaar. De energiebesparingen zijn wel afhankelijk van de locatie. Dit komt doordat de rijtijdspeling in de traditionele dienstregelingen suboptimaal over het netwerk verdeeld is.

Geconcludeerd wordt dat EZR op netwerkniveau positief bijdraagt aan OTR, de veiligheid en energiebesparing. De hoeveelheid en de verdeling van de rijtijdspeling zijn daarbij van grote invloed.

1. Op de trein wil je kunnen vertrouwen als op een uurwerk

Een demonstratievideo van NS uit de jaren '90 over punctueel rijden concludeert [1]: *“95% van de treinen is binnen de marge op tijd. Maar de overige 5% is beslissend voor de toekomst. Of de mensen dan nog wel met ons willen reizen? Op de trein wil je kunnen vertrouwen als op een uurwerk. Maar in deze tijd is het meer dan ooit nodig om te letten op de secondewijzer.”*

Het inzicht is er dus al decennia en gaat zelfs nog veel verder terug dan dat: voor de reiziger is betrouwbaarheid van het treinproduct in belangrijke mate bepalend voor de aantrekkelijkheid ervan. Daarvoor is er enerzijds een degelijke planning nodig die tolerant is voor kleine onregelmatigheden in de uitvoering en in de planning zelf. Anderzijds is van de uitvoering gevraagd om zich te houden aan die planning.

Een middel om de dienstregeling robuust te maken voor minder gunstige omstandigheden is de toevoeging van rijtijdspeling aan de technisch minimale rijtijd. Rijtijdspeling is de extra rijtijd bovenop de minimale/kale rijtijd tussen twee dienstregelpunten om in iets slechtere omstandigheden dan berekend toch nog op tijd aan te komen of om in goede omstandigheden mogelijke vertragingen in te lopen (herstel van vertraging) [2]. Zonder die speling zorgen kleine vertragingen onmiddellijk voor een latere aankomst dan gepland. Dit betekent tevens dat er bij normale omstandigheden een overschot aan rijtijd is. Bij 'tijd-optimaal' (zo snel mogelijk) rijden komt een trein dan te vroeg aan, omdat de speling niet wordt gebruikt. Als men de trein exact op tijd wil laten arriveren, dan is het dus nodig om ingehouden te rijden. Er zijn verschillende rijstrategieën mogelijk om ingehouden te rijden. Economisch gezien heeft de meest energiebesparende rijstrategie de voorkeur, namelijk door de trein te laten uitrollen [3]. De geplande rijtijdspeling komt bij die strategie goed van pas, want dankzij de relatief lage rolweerstand en de hoge massa rolt een trein lang uit en is de energiebesparing substantieel.

Het zogenaamde energiezuinig rijden (EZR) bestaat als beleidsspeerpunt bij NS in wezen al langer dan dat van punctualiteit. Al vanaf het begin van de treinexploitatie in Nederland, in het stoomtreintijdperk, spoorde de grootste reizigersvervoerder van Nederland haar machinisten aan om de totale energievraag over een traject te minimaliseren. Vanaf de jaren '60 heeft NS haar beleid geconcretiseerd door EZR-hulpmiddelen aan te reiken aan machinisten en conducteurs [4]. Toen was EZR nog een doel op zich: energiebesparing draagt immers bij aan een positieve financiële balans. In het laatste decennium van de vorige eeuw en in de eerste jaren van deze eeuw gaf NS prioriteit aan punctualiteitsverbetering, ten koste van energiebesparing. In die tijd leefde de (onterechte) opvatting dat EZR de punctualiteit belemmerde. Toen in de eerste jaren van deze eeuw de punctualiteit sterk verbeterde, is EZR opnieuw onder de aandacht gekomen.

Inmiddels streeft NS niet meer afzonderlijk naar punctueel rijden of naar energiebesparing, maar naar de toepassing van een energiebesparende rijstrategie als effectief middel om op de seconde op tijd te rijden. Op Tijd Reizen (OTR) is het gezamenlijke programma van NS en ProRail om deze doelstelling kracht bij te zetten. Punctualiteit bij OTR kent met op de seconde nauwkeurig rijden een hoger ambitieniveau dan die in geldende concessienormen omschreven staat, waar de grens op 3 of zelfs 5 minuten ligt en bovendien alleen wordt gekeken naar te late aankomsten [5]. OTR draagt dus positief bij aan de punctualiteit volgens de (nu nog) geldende afspraken. Als middel om OTR te realiseren heeft NS gekozen voor de EZR-strategie. Daarbij mag

energiebesparing nooit leiden tot late aankomsten. Dit gebeurt ook niet, want effectief toegepast EZR zorgt voor aankomsten precies op tijd. Het hoofddoel van OTR is om de spreiding in de uitvoering zodanig te verminderen, dat verhoging van de frequentie op de drukke corridors binnen handbereik komt. Het Programma Hoogfrequent Spoor – PHS is daarvan de uitwerking. De bedoeling is dat door reductie van de spreiding van gerealiseerde rijtijden ook de punctualiteit stijgt. Op Tijd Reizen is opgedeeld naar de programma's Op Tijd *Rijden* (taak machinist) en Op Tijd *Halteren* (taak conducteur) met bijhorende KPI's [6].

Er is al onderzoek gedaan naar het effect van EZR op het energieverbruik en op de punctualiteit [2, 7]. In dit onderzoek is de huidige EZR-methodiek van NS vergeleken met de energie-optimale rijstrategie en is gekeken naar het effect van de rijtijdspeling voor energiezuinig rijden. Daaruit is gebleken dat de verdeling van de speling grote invloed heeft op de mogelijkheden voor EZR. Het onderzoek richtte zich vooral op een enkele trein zonder naar de netwerkeffecten te kijken. Deze netwerkeffecten zijn van groot belang, omdat de optimale rijstrategie van een trein afhankelijk is van de positie van andere treinen in het netwerk.

Het doel van deze paper is om aan de hand van een casestudy aan te tonen wat de positieve netwerkeffecten zijn van een energiebesparende rijstrategie op de spreiding in de uitvoering, de doorstroming, OTR / punctualiteit, de veiligheid en het energieverbruik. In de toekomst zullen voldoende uitrolmogelijkheden, leidend zijn in het dienstregelingsontwerp.

De paper is als volgt opgesteld. De eerste twee secties geven achtergrondinformatie over de rijtijdspeling en energiezuinig rijden (EZR). Sectie 2 gaat dieper in op het principe van rijtijdspeling en de traditionele werkwijze met de consequenties voor de uitvoering. Sectie 3 beschrijft hoe EZR als methode voor Op Tijd Rijden (OTR) dient. In Sectie 4 wordt een casestudy beschreven waarin wordt onderzocht wat het effect van EZR op netwerkniveau Deze case studie is gebaseerd op het afstudeeronderzoek van Michiel Jansen van Galen [8]. Tot slot worden in Sectie 5 de conclusies besproken.

2. Planning van rijtijdspeling en praktische consequenties

Deze sectie gaat in op de traditionele wijze waarop rijtijden worden toegekend in de dienstregeling en op de praktische consequenties daarvan. Dit is de werkwijze voor er met Dienstkaartje-IN-Tienden (DINT) werd gewerkt, waarbij met een nabewerking de minutentijden in tienden van minuten op het dienstkaartje komen [9]. Hierdoor ontstaat er begrip van de beperkingen van de traditionele werkwijze en tegelijkertijd het potentieel voor OTR en energiebesparing.

Om te begrijpen waar het potentieel voor tractie-energiebesparing vandaan komt, is in de eerste plaats kennis nodig van de wijze waarop treinen worden gepland in Nederland. De planning gebeurt in het door ProRail en NS ontwikkelde systeem Donna. Dit programma berekent de rijtijden en rond deze af naar hele minuten op dienstregelpunten. Dit zijn punten in het spoor waar een tijd nodig is voor de planning en de communicatie. Voor de minimaal benodigde tijd tussen treinbewegingen ('opvolgtijd') rekent het met normen (bijvoorbeeld vier minuten). De machinist en de conducteur zien de afgeronde tijden op hun dienstkaartje.

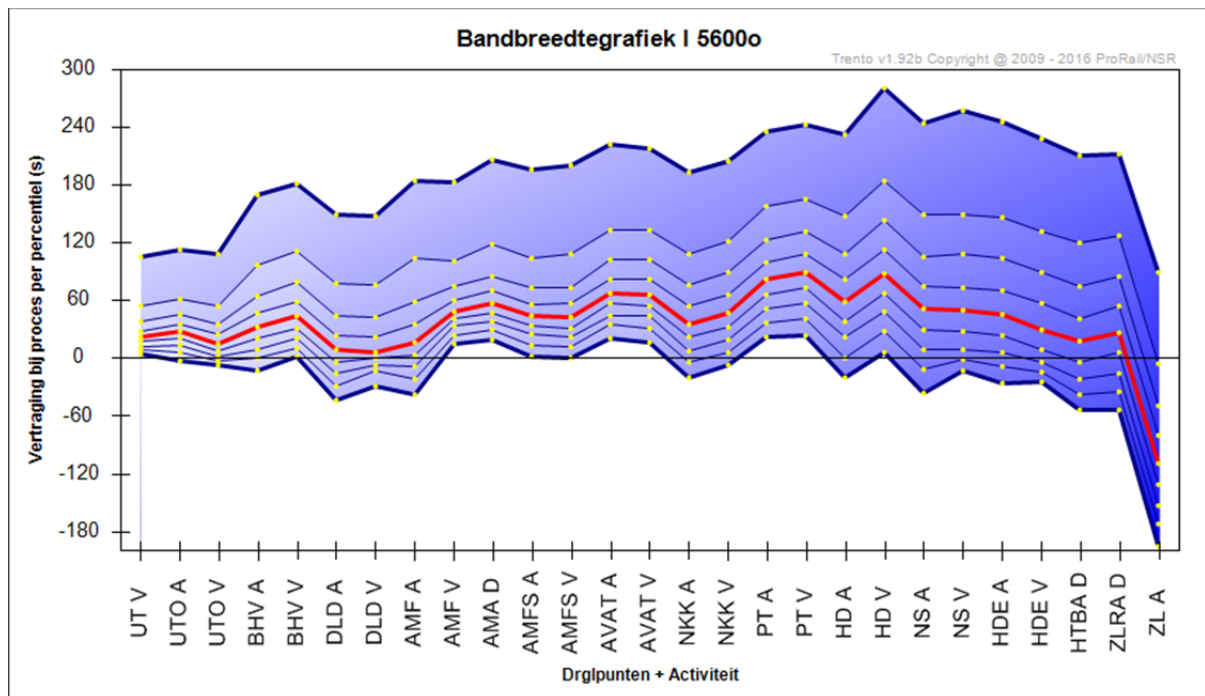
In de planning worden de 'kale' of technisch minimale rijtijden berekend (tijd-optimale rijstrategie). Dit is de kortst mogelijke rijtijd, gegeven de meest gunstige omstandigheden. Op de kale rijtijd past men rijtijdspeling toe, die in beginsel minimaal 5% is tussen knopen [10]. Een knoop is een station waar een reiziger binnen een bepaalde tijdsperiode van elke intercity of stoptrein, op elke andere intercity of stoptrein kan overstappen [11]. Deze speling is bedoeld om enerzijds afwijkingen tussen theorie en praktijk op te vangen (beperkingen van rekenwijze) en anderzijds om kleine hinderingen als wind en glad spoor, ondermaatse materieelcondities, maar ook variërend rijgedrag te kunnen compenseren. Rijtijdspeling biedt ook tolerantie voor inlopen van kleine vertragingen.

De rijtijd inclusief de speling wordt afgerond op hele minuten volgens de regels uit de Netverklaring [10], waardoor het effectieve spelingspercentage flink varieert. Op kleinere stations (haltes) vindt veelal afronding naar beneden plaats. Daardoor is er op het einde van een traject, op de knoop, een overschot aan speling. Deze rekenwijze resulteert in een variatie van rijtijdspeling tussen twee haltes van wel tientallen procenten, waarbij mogelijk negatief. Een reden voor bewuste concentratie van speling op knopen is dat er op die knopen sprake is van samenkomst van treinverkeer uit verschillende richtingen dat om wat grotere buffers vraagt. Op knopen is er namelijk relatief veel kans op uitstraling van een eventuele vertraging naar andere treinen, de zogenaamde olieplekwerking. Bovendien zijn er vanwege de beperkte spoorcapaciteit soms extra minuten in de dienstregeling nodig ('uitbuigen'), met veel extra rijtijdspeling op de knoop als gevolg. Dit kan overigens bij de nieuwe methode DINT- 'Dienstkaartje-IN-Tienden' nog steeds het geval zijn.

Sprinters (dat zijn stoptreinen die niet alleen op knopen halteren maar alle tussenliggende haltes aandoen) krijgen dus weinig speling of zelfs negatieve speling op het traject tussen twee knopen en veel speling op de knoop zelf. Deze strategie wordt ook wel 'opjagen' of 'straktrekken' genoemd, die is bedoeld om de punctualiteit te vergroten [2]. Het nadeel van concentratie van speling op de knopen is het risico dat treinen er ruimschoots te vroeg aankomen bij tijd-optimaal rijden en als gevolg daarvan moeten wachten op het beschikbaar komen van de sporen. Dit heeft als gevolg dat de trein opnieuw moet aanzetten bij het veilig komen van de rijweg, wat gevaarlijk is als dat te vroeg gebeurt. Soms dekt het beveiligingssysteem dit namelijk niet af. Bovendien kan deze ongeplande stilstand mogelijk juist voor een vertraging zorgen door het verlies in rijtijd, doordat de trein weer terug op snelheid moet komen.

Ook vanuit het energiebesparingspotentieel is de ongelijke verdeling van de rijtijdspeling ongewenst, waarvan Sprinters de meeste hinder hebben. Door de concentratie van speling is er aan het begin van het traject geen ruimte om uit te rollen. Aan het einde van het traject is de hoeveelheid speling juist overmatig en alleen volledig te gebruiken door met een zeer lage snelheid naar de knoop te rijden. Dit is vanuit de bedieningskwaliteit van treindiensten niet gewenst. Het risico van een te vroege aankomst is ook vanuit energieconsumptie bezwaarlijk: de extra energie die nodig is om opnieuw op snelheid te komen, komt nog eens bovenop de verspilde remenergie door te vroeg aan te komen.

De uitvoering van de Sprintersserie 5600 van Utrecht Centraal naar Zwolle is illustratief voor de beperkingen van de oude manier van rijtjidsdeling. Figuur 1 laat zien wat de ongelijke spelingsverdeling oplevert voor de bandbreedte in aankomsten en vertrekken per halte. De rode lijn geeft de mediaan (vijftigste percentiel) van de vertraging aan met daar omheen de bandbreedte (in tienden percentielen). Tot aan de knoop Zwolle rijdt de trein vrijwel altijd achter op dienstregeling. Bij de knoop Zwolle is er een overschot aan speling en komt de trein vrijwel altijd te vroeg aan, gemiddeld ongeveer twee minuten.



Figuur 1: Bandbreedtegrafiek van de gerealiseerde vertragingen van de Sprintersserie 5600 tussen Utrecht Centraal en Zwolle (2016, nog geen Dienstregeling In Tienden van Minuten). De rode lijn geeft de mediaan van de vertraging in seconden aan, de horizontale zwarte lijn de geplande tijden en de blauwe lijnen de percentielen [12].

Om de speling beter te kunnen verdelen en vooral om daadwerkelijk op de beoogde totale rijtjidsdeling van een traject uit te komen, is een eerste behulpzame slag om de dienstregelingstijden te verfijnen en het uitvoerend personeel te laten beschikken over die verfijnde tijden. Die stap is gezet met het programma DINT -'Dienstkaartje IN Tienden' [9]. Figuur 1 is nog zonder DINT, dus is gemeten ten opzichte van afgeronde hele minuten. Met DINT kunnen de machinist en de conducteur beter op OTR sturen. De huidige heersende zienswijze is om naar 8% rijtjidsdeling te gaan op basis van afronden op tienden van minuten, in plaats van de oude 5% [13]. Dit is waarschijnlijk nodig vanwege het loslaten van de afrondingen naar boven. Het project DINT is een eerste stap richting PINT (*Plannen* IN Tienden van Minuten), waarbij capabiliteit van de planningstool voorwaardelijk is. Donna is hier (nog) niet toe in staat.

3. Energiezuinig rijden als methode voor Op Tijd Reizen

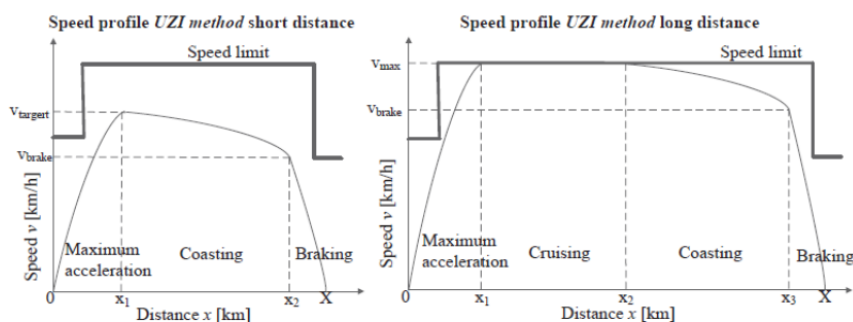
Deze sectie beschrijft hoe energiezuinig rijden werkt en hoe die strategie dienend is voor de punctualiteit. Hierbij komt ook de rolverdeling van het uitvoerend personeel aan de orde.

Het doel van EZR is om de tractie-energie te minimaliseren gegeven de beschikbare rijtijd tussen twee stations. Bij EZR wordt gebruik gemaakt van de rijtijdspeling die beschikbaar is vanuit de dienstregeling. De geplande aankomst en doorkomsttijd vormen altijd het ijkpunt om te bepalen op welke manier een trein ingehouden rijdt om zo precies op tijd aan te komen. Het OTR-doel om exact op tijd te rijden wordt dus kracht bij gezet met deze benadering. Er wordt als vanzelf toegewerkt naar exact op tijd aankomen.

De energie-optimale rijstrategie kan bepaald worden met *optimal control theory*, waarmee de noodzakelijke condities voor de optimale rijstrategie bepaald worden [3]. Deze theorie resulteert in het feit dat in de basis de energie-optimale rijstrategie bestaat uit de volgende rijregimes: maximaal accelereren, kruissnelheid aanhouden, uitrollen en remmen. Met behulp van de noodzakelijke condities uit deze theorie is het met een efficiënt wiskundig algoritme mogelijk om de optimale volgorde en wisselpunten te berekenen tussen de rijregimes. Voor meer theoretische achtergrond wordt verwezen naar de papers van Howlett and Pudney [14], Albrecht, Howlett [15], Albrecht, Howlett [16]. Daarnaast is een literatuuroverzicht over dit thema te vinden in het review paper van Scheepmaker, Goverde [3].

Bij NS is EZR geïmplementeerd in de UZI (Universeel Zuinig rijden Idee)-methode die ontwikkeld is door NS-machinist Freddy Velthuisen. Dit is een methodiek die zich enkel richt op het bepalen van het optimale uitrolmoment en de methodiek is geldig voor elk materieel van NS. Deze methode geeft op basis van de hoeveelheid rijtijd tussen twee stops en de baanvaknelheid het optimale uitrolmoment aan, zie Figuur 2 [4, 7, 17]. De UZI-methode is statisch en om meer besparingen te kunnen behalen is een dynamische UZI-methode noodzakelijk. Hiervoor doet NS onderzoek naar de RoITijd App, een eenvoudige DAS die enkel uitroladvies geeft. Deze app stuurt de machinist aan om exact op tijd aan of door te komen op kritieke dienstregelpunten (doorkomst of aankomst).

Short distance (without cruising)		Long distance (with cruising)	
Running time [min]	Coasting speed [km/h]	Speed limit [km/h]	Coasting time before arrival [min]
2	80	140	8 (not for rolling stock SGM)
3	90	130	7 (not for rolling stock SGM)
4	100	120	6
5	110	110	5
6	120	100	4
7	130 (not for rolling stock SGM)		
8	140 (not for rolling stock SGM)		



Figuur 2: visualisatie van de UZI-methode [7].

Welke rijstrategie er ook gekozen wordt; de uitdaging is om de machinist en de hoofdconducteur op een effectieve manier te ondersteunen door concrete snelheidsadviezen te geven. Daartoe zijn al diverse systemen ontwikkeld en getest, ook wel *Driver Advisory System* (DAS) genoemd, waar de RoTijd App er een van is. Voor meer informatie over DAS wordt verwezen naar de paper van Panou, Tzieropoulos [18].

Vanuit de OTR-principes is de machinist er verantwoordelijk voor om de trein exact op tijd laten arriveren. Dit is het onderdeel *Op Tijd Rijden* binnen OTR. De machinist dient daartoe op tijd te vertrekken en heeft inzicht nodig in het juiste 'uitschakelmoment' en de benodigde snelheid. Bij een substantiële vertraging (groter dan de extra rijtijd die de rijtijdspeling beschikbaar stelt), geldt dat sturing op energiezuinig rijden komt te vervallen en de focus geheel op beperking van vertraging ligt. Dit betekent dat dan van de machinist wordt verwacht dat deze de maximaal toegestane snelheid rijdt om zo de vertraging in te lopen. Een optimale EZR-toepassing vergt scherpe sturing op de geplande vertrektijd, door- en aankomsten. Enkel aandacht voor energiebesparing en een geforceerde toepassing ervan bij een substantiële vertraging kan er juist toe leiden dat de trein later dan gepland vertrekt, door- of aankomt. De trein rijdt dan te zuinig en het topstreven om exact op tijd rijden komt in het geding. Dit kan een onbedoeld gevolg zijn van de EZR-prestatiedoelstellingen die managers meegeven aan machinisten, is gebleken uit de monitoring van EZR-prestaties.

De hoofdconducteur is verantwoordelijk voor het onderdeel *Op Tijd Halteren* binnen OTR. De conducteur heeft als belangrijkste taak om de deuren te sluiten, zodat de machinist de trein precies op tijd in beweging kan zetten. De conducteur dient op elk station over de exacte vertrektijden te beschikken. Op dit moment geldt vooral bij haltes (kleinere stations die in de regel alleen door Sprinters worden bediend) dat doorgaans naar beneden afgeronde vertrektijden onrealistisch zijn. 'Zo kort mogelijk halteren' is de enige aanwijzing voor de conducteur, maar in sommige gevallen leidt dat toch tot een te vroeg vertrek als deze juist naar boven is afgerond en/of als de geplande halteertijd te ruim is. Te vroeg vertrekken is zeer bezwaarlijk, omdat een deel van de reizigers hierdoor hun zal missen, met veel extra reistijd tot gevolg.

4. Casestudy: de punctualiteitswinst van OTR op netwerkniveau

Deze sectie beschrijft het onderzoek dat Royal HaskoningDHV begin 2016 heeft uitgevoerd met het treinverkeerssimulatieprogramma OpenTrack. Dit onderzoek is onderdeel van de masterscriptie van Michiel Jansen van Galen [8]. De centrale vraag in dat onderzoek is: 'Op welke manier leidt toepassing van OTR bij reizigerstreinen tot een algemeen meer punctueel treinproduct ten opzichte van tijd-optimaal rijden?' Dit onderzoek gaat in de prestatiemeting nog uit van punctualiteit zoals gedefinieerd in de concessie-afspraken en niet van OTR en de pre-DINT, dus dienstregelingtijden in minuten. Een punctualiteitsverbetering betekent echter ook een verbetering ten aanzien van OTR, dus de conclusies zijn nog steeds relevant.

Als methode voor OTR geldt toepassing van EZR, conform het huidige beleid van NS. Innovatief aan dit onderzoek is dat die toepassing dynamisch gebeurt (vertragingsafhankelijk) en de effecten op netwerkniveau worden beschouwd, met realistische beginvertragingen volgens recente praktijk meegenomen. Het onderzoek vergelijkt de traditionele rijstrategie (tijd-optimaal) met de EZR-strategie, met de beschikbare rijtijdspeling als gegeven.

De hypothese bij het onderzoek is dat de EZR-methode leidt tot een reductie van de spreiding van aankomst- en doorkomsttijden, waardoor hinderingen afnemen en de punctualiteit toeneemt. Naast punctualiteitseffecten kijkt het onderzoek naar conflicten in het treinverkeer en de daarmee samenhangende veiligheid, de toepasbaarheid van de geldende rijtjidspeeling en geeft het de orde-grootte energiebesparing.

4.1 Methode

Het onderzoek brengt de effecten van EZR bij reizigerstreinen in kaart met behulp van een stochastische simulatie met de tool OpenTrack. OpenTrack is een microscopische simulatietool van de dienstregeling en de tool is ontwikkeld door de Universiteit van Zürich [19]. In dit model zijn de elementen van het materieel en de spoorinfrastructuur tot in het kleinste detail opgenomen, zoals wissels, seinen met seinbeeldrelaties en spoorsecties. Treinbewegingen en -opvolgingen zijn daarmee nauwkeurig en dynamisch (treinen rijden tegelijkertijd) te berekenen. Royal HaskoningDHV ontwikkelt en beheert het Nederlandse spoorwegnetwerk in OpenTrack. Het onderzoek gaat uit van vertragingen op de beginpunten van het model conform een typische exploitatiedag. De kans op een substantiële vertraging is echter klein, want in de praktijk vertrekken de meeste treinen rondom de geplande tijd. De rijstrategie om exact op tijd aan te komen is dynamisch, dat wil zeggen dat het model frequent de beste rijstrategie herziet, afhankelijk van vertragingen in het netwerk. In dit onderzoek rijden goederentreinen altijd tijd-optimaal.

Voor reizigerstreinen geldt er een tweetal scenario's met verschillende rijstrategieën:

- 'Traditionele' rijstrategie: tijd-optimaal. In deze rijstrategie is er geen sprake van uitrollen, maar van de snelheid vasthouden (kruisen) en pas op de vereiste locatie beginnen met remmen om op de juiste plek tot stilstand te komen (bij een sein of bij het laatst mogelijk rempunt bij een vrije remming). Binnen de traditionele rijstrategie gelden er nog twee substrategieën afhankelijk van de eventuele vertraging, met de rijprestatie als onderscheidende factor. Die rijprestatie is een percentage van de optimale aanzet, kruissnelheid en remming. 95% betekent bijvoorbeeld dat de trein aanzet met 95% van de maximale trekkracht van de trein, op 95% van de maximaal toegestane snelheid rijdt en dat de remming plaatsvindt met 95% van de normale dienstremming. De twee prestatieniveaus zijn als volgt:
 - Absoluut tijd-optimaal rijden (prestatie is 100%): zo snel mogelijk.
 - Conservatief rijden (prestatie is 95%): met anticipatie op vertragingen. Bij vertraging 97% prestatie om de vertraging in te lopen.
- EZR-strategie: alle reizigerstreinen starten met uitrollen op het optimale punt vanuit de EZR-methodiek. Het optimale punt is afhankelijk van de vertraging en gebaseerd op de exacte speling per deeltraject. Deze punten zijn bepaald door een trein voluit te laten rijden bij verschillende vertragingen. Er zijn optimale punten vastgesteld bij een vertraging van 0, 15, 30, 45, etc. seconden, zolang de vertraging niet groter is dan de maximale speling op het traject. Treinen schakelen dus afhankelijk van de vertraging de tractie uit op het bijbehorende optimale punt. Het model stuurt daarmee op precies op tijd aankomen op het volgende station, zodat de rijtjidspeeling maximaal wordt benut voor uitrollen.

Het punt is getoetst met een maximale afwijking van 5 seconden rondom de geplande aankomst als norm. Bij de EZR-strategie gelden nog de volgende aannames:

- o De rijstrategie anticipeert niet op nabije treinen in het netwerk.
- o De minimale uitrolsnelheid is 80 km/h, om lange spoorbezetting en lange dichtligtijden van overwegen te vermijden en te veel toename van de reistijd, dat commercieel onaantrekkelijk is.

De resultaten van het onderzoek worden beoordeeld op een drietal criteria die in volgorde van relevantie worden behandeld:

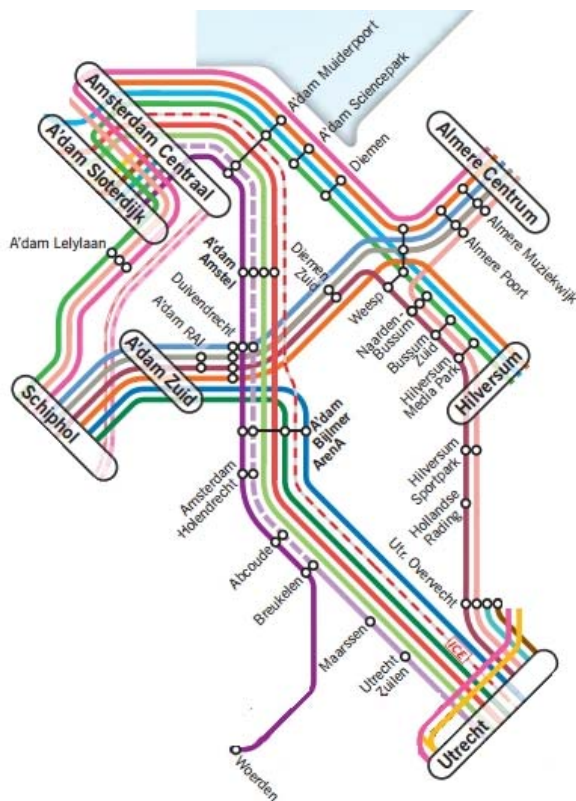
- Veiligheid, aan de hand van gedwongen remmingen door conflicterende rijwegen.
- Punctualiteit, de belangrijkste uitkomst van de EZR-rijstrategie.
- Energieverbruik, de gewenste opbrengst van een effectieve benutting van de rijtijdspeeling.

4.2 Uitgangspunten

Deze sectie beschrijft de gehanteerde uitgangspunten van het onderzoek.

Infrastructuur

Het onderzoek beschouwt een deel van de Randstad met de grotere stations, zie Figuur 3. De infrastructuur betreft een basisplan uit 2014. Dit gebied is een relatief intensief bereden deel van het Nederlandse spoorwegnet en is voldoende groot voor een representatief beeld van de effecten op het landelijke spoornetwerk. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de microscopische infrastructuurdata (seinen, wissels, lassen, hellingen, etc.) [20].



Figuur 3: Onderzoekgebied case studie met bijbehorende reizigerstreinseries [8].

Dienstregeling

Het onderzoek gebruikt hetzelfde basisplan voor de dienstregeling als voor de infrastructuur. Het plan kent een mix van Intercity's, Sprinters, internationale- en goederentreinen. Voor reizigerstreinen gelden standaard materieelsamenstellingen. Figuur 3 toont de reizigersdiensten binnen het onderzoeksgebied. Goederentreinen kennen wel specifieke lengtes en tonnages volgens de uitvoering, omdat die samenstelling veelal sterk afwijkt van het plan.

Vertragingsverdelingen

Vertragingsverdelingen voor de initiële vertrek- en halteertijden zijn gebaseerd op realisatiedata uit 2014. Vertragingen voortkomend uit incidenten of infrastoringen zijn uitgesloten van de data.

4.3 Resultaten

Veiligheid

Het onderzoek toont het aantal hinderingen in de rijwegen bij de traditionele strategie en de EZR-strategie aan. Tabel 1 toont de belangrijkste resultaten bij het aantal optredende conflicten in de rijwegen. Bij deze conflicten wordt een remming afgedwongen door het seinstelsel. Het kan gaan om een geel sein of een rood sein. Beide seinbeelden vereisen een ander soort remming, waarbij het naderen van een rood (stoptonend) sein kan leiden tot een volledige stop en het meest bezwaarlijk is, omdat een roodsein-passage een direct gevaar is.

Tabel 1: Gemiddeld aantal conflicten per rit naar type [8].

<i>Gemiddeld aantal conflicten per rit</i>	<i>Traditionele strategie</i>	<i>EZR-Strategie</i>	<i>Vershil in %</i>
Roodseinnadering met een volledige stop	0,22	0,19	-10,7
Roodseinnadering zonder een volledige stop	0,57	0,52	-10,0
Geel seinpassage	3,12	2,68	-14,3

De conclusie is dat toepassing van EZR leidt tot een reductie van zowel geelseinpassages als roodseinnaderingen. Het aantal roodseinnaderingen is teruggedrongen met ongeveer 10%. De belangrijkste reden voor de daling van het aantal conflicten is dat treinen niet meer te vroeg aankomen, maar op de geplande tijd.

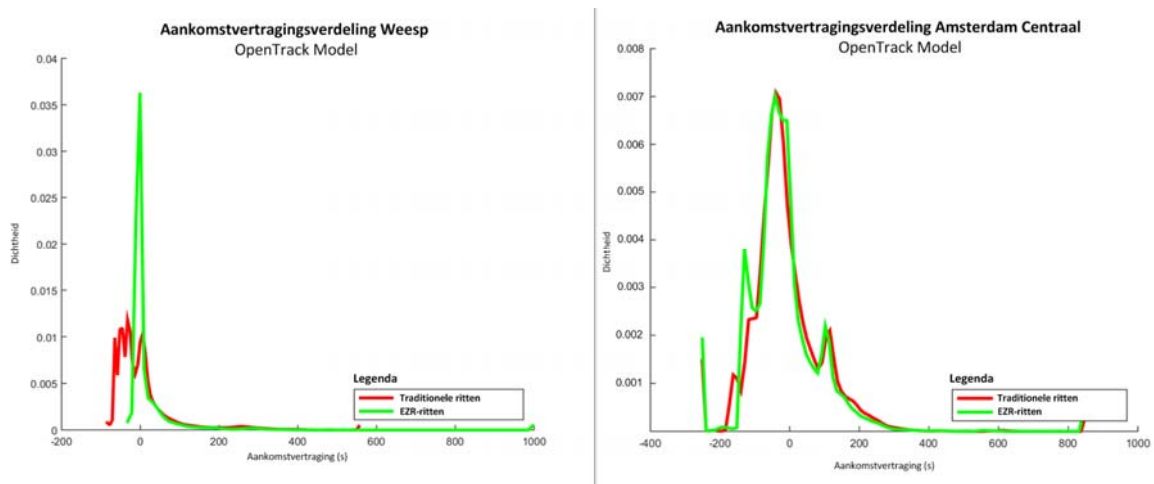
Punctualiteit

Het onderzoek leidt tot de volgende conclusies:

- Door EZR-toepassing de spreiding van aankomsttijden ten opzichte van de traditionele rijstrategie afneemt met gemiddeld 11,6% en dat deze zich geconcentreerd rondom exact geplande aankomst (0 seconden vertraging). Deze spreiding heeft een bandbreedte tussen de 5% (Amsterdam Centraal) en 30% (Weesp). Figuur 4 is illustratief voor het effect van op de spreiding. De figuur links toont Weesp, waarbij de spreiding van de aankomstvertragingen flink afneemt. De rode lijn geeft de verdeling aan bij een traditionele rijstrategie en de groene lijn geeft de verdeling aan bij een EZR-strategie. De figuur rechts toont Amsterdam

Centraal, waarbij in het bredere gebied door vaste snelheidsbeperkingen uitrollen slechts beperkt kan worden toegepast. Daardoor is er nauwelijks een verandering in het patroon.

- Op basis van de drieminutennorm verslechtert de punctualiteit niet, want er is immers sprake van een spreidingsreductie. Dit betekent dat EZR niet beperkend is voor de punctualiteit volgens de concessie-afspraken.
- Het aantal te vroeg aankomsten neemt fors af. Dit gebeurt alleen nog als er een overschot aan rijtijdspeling is die niet meer bruikbaar is om uit te rollen.



Figuur 4: Distributie van de aankomstvertraging (s) met de traditionele rijregime (rood) en EZR-strategie (groen). Afbeelding links: station Weesp, waar de spreiding flink afneemt als gevolg van de EZR-regime, waardoor er meer aankomsten plaatsvinden op de geplande aankomsttijd. Afbeelding rechts: station Amsterdam, waar de spreiding ongeveer gelijk blijft, omdat de mogelijkheden om uit te rollen zeer beperkt zijn [8].

Er dient te worden opgemerkt dat de beginvertragingen uit de uitvoering mede voortkomen uit de traditionele manier van plannen en de beperkte sturing op EZR in de uitvoering. De verwachting is dat beginvertragingen afnemen als gevolg van een sturing op EZR. Er is dus sprake van een opstapeleffect.

Energieverbruik

Het onderzoek laat het tractie-energieverbruik aan het wiel zien. Hierbij worden geen energieverliezen vanuit inefficiëntie vanuit de motoren, verliezen over de bovenleiding en hulpverbruiken meegewogen (zoals de energie die gebruikt wordt voor het klimaatsysteem van de trein) [21].

Logischerwijs leidt toepassing van EZR tot een significante daling van het energieverbruik. Er is sprake van een daling van 11%-15%, afhankelijk van de invulling van de traditionele strategie (95% of 100% prestatie). Tabel 2 hieronder laat de besparingen zien.

Tabel 2: Percentuele energiebesparing met EZR per beschouwde traditionele rijstrategie.

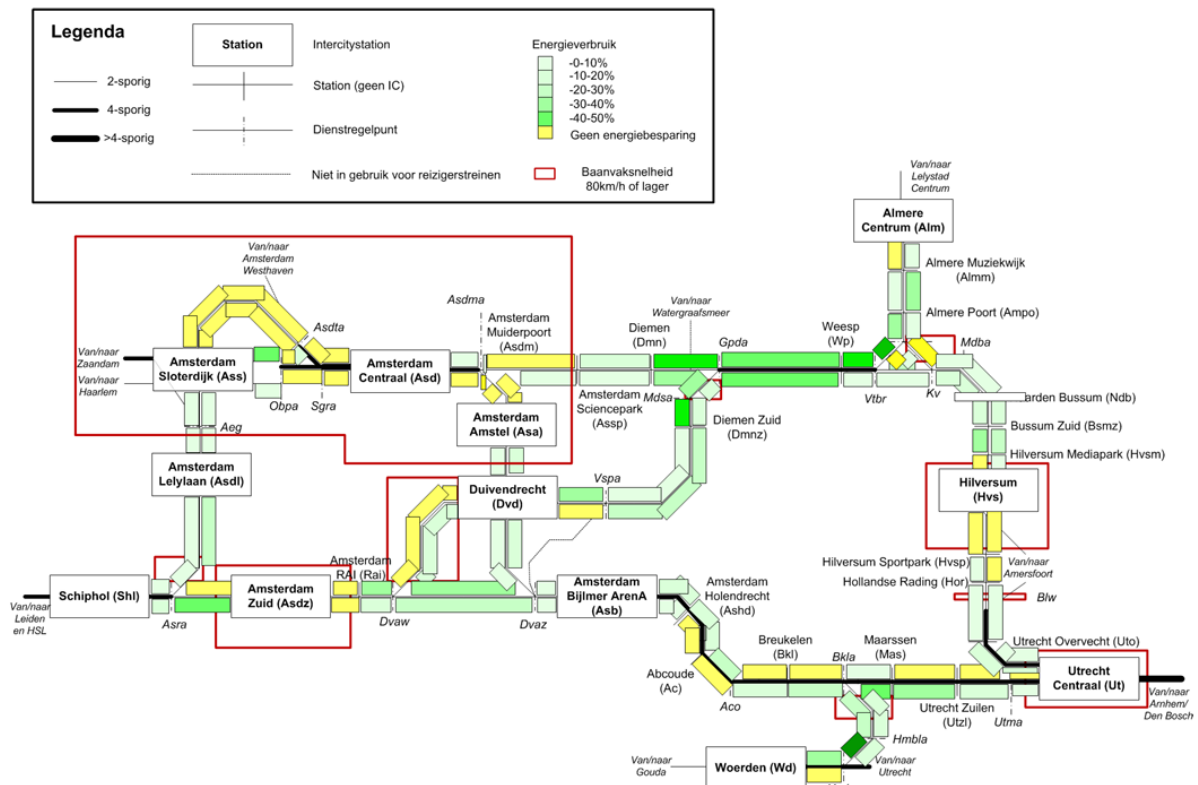
<i>EZR-strategie ten opzichte van specifieke traditionele strategie</i>	<i>Besparing</i>
EZR t.o.v. 95% rijprestatie	11%
EZR t.o.v. 100% rijprestatie	15%

Het onderzoek toont aan dat op dit intensief bereiden deel van het Nederlandse spoornetwerk een significante energiebesparing mogelijk is, zelfs bij vertragingen waarbij EZR niet kan/mag worden toegepast. Het onderzoek laat ook zien dat bij uitrollen vanaf lagere snelheid een veel geringere energiewinst geboekt kan worden dan vanaf hoge snelheid.

Figuur 5 laat zien hoe de energiebesparingspotentie over het onderzoeksgebied verdeeld is. Daaruit is te concluderen dat die potentie flink varieert. Een goed voorbeeld van een hoge besparingspotentie is het traject tussen Diemen Zuid en Weesp, waarbij treinen in de beschouwde dienstregeling veel bruikbare rijtijdspeling hebben. Op sommige deeltrajecten is de besparingspotentie beperkt. Dit kan komen door (een combinatie van):

- Gebrek aan rijtijdspeling. Bijvoorbeeld het 'opjagen' van Sprinters vanuit de dienstregeling veroorzaakt ondanks tijd-optimaal rijden toch te late aankomsten. De besparingspotentie is dus nihil.
- Wijze van weergave in het figuur: op sommige deeltrajecten is acceleratie, snelheid vasthouden of remming vereist.

Het onderzoek laat tevens zien dat op sommige deeltrajecten er overvloed aan rijtijdspeling is (aangegeven met rode kaders in Figuur 5). Dit geldt vooral rondom de knopen. Dit hangt samen met het uitgangspunt in het onderzoek van een minimaal 80 km/h op de vrije baan, vanwege de dichtliggende van overwegen en de perceptie van reizigers die onder de 80 km/u een trage reis beleven. Een overschot aan speling is op die trajecten bezwaarlijk, want een te vroege aankomst met mogelijk een roodseinnadering tot gevolg is dan onvermijdelijk.



Figuur 5: Energiebesparingspotentieel op de deeltrajecten [8].

5. Conclusies

Dit artikel onderbouwt aan de hand van een casestudy dat een juiste toepassing van energiezuinig rijden (EZR) effectief is voor het op tijd laten arriveren van treinen. Het bekrachtigt daarmee de doelstelling van het NS-ProRail-programma Op Tijd Reizen (OTR). Het ultieme doel is om met een consistente dienstregeling in normale omstandigheden altijd exact op tijd aan te kunnen komen. Dit is een gemeenschappelijk belang van spoorbeheerder ProRail en vervoerder NS. Beide partijen zijn namelijk gebaat bij een hoge punctualiteit vanwege de klantwaarde (korte en betrouwbare reistijden) en vanwege prestatieafspraken. De EZR-methode komt goed van pas voor NS. Ten eerste omdat een kosteneffectieve exploitatie nodig is voor een positief bedrijfsresultaat (treinvervoer is een gesubsidieerd product). Ten tweede omdat er behoefte is aan consistentie in de dienstregeling: een uitvoerbaar plan.

De casestudy in OpenTrack toont aan dat toepassing van EZR gunstig is voor de veiligheid, punctualiteit/OTR en het energieverbruik. EZR leidt tot een spreidingsreductie van aankomsttijden geconcentreerd rondom de geplande aankomsttijd, in lijn met de OTR-doelstelling. Dit betekent tevens een hogere punctualiteit volgens de geldende drieminutennorm en minder remmingen vanwege te vroege aankomsten. Bovendien is door de afname van spreiding de kans op onderlinge conflicten in het treinverkeer minder. Dit heeft een versterkend effect. Op landelijke schaal is er een besparing mogelijk van 15% per jaar ten opzichte van de traditionele rijstrategie (tijd-optimaal rijden). Tevens laat het onderzoek zien dat de energiebesparingspotentie beperkt wordt door de traditionele wijze van rijtijdspelingverdeling: het 'opjagen' van treinen en de concentratie van speling op de knopen. Op sommige trajecten is er te weinig speling gepland om uit te rollen, mogelijk zelfs negatief. Treinen komen dan per definitie te laat aan. Op andere deeltrajecten kan lang niet alle geplande speling worden gebruikt om uit te rollen. Treinen komen dan per definitie te vroeg aan.

Om de EZR-potentie ten volle te benutten en zo de OTR-doelstelling te bekrachtigen, is een aantal maatregelen nodig in het dienstregelingsontwerp en in de uitvoering. Aan de uitvoeringskant is het nodig om machinisten en conducteurs te helpen in het exact op tijd rijden. Een DAS is daarbij dienend. Aan de ontwerpkant is het nodig om de noodzakelijke rijtijdspeling effectief toe te delen in de dienstregeling volgens de EZR-methode. Doordat EZR-optimalisatie echter vooralsnog een nabewerkingsslag is, blijven de mogelijkheden om exact op tijd aan te komen en energie te besparen beperkt. De echte grote winst vindt plaats als de EZR-methode *onderdeel* gaat uitmaken van het dienstregelingsontwerpproces, zodat het onder normale omstandigheden mogelijk is om op elk station en elk halte exact op tijd aan te komen en te vertrekken.

Dankwoord

De auteurs willen Michiel Jansen van Galen bedanken voor zijn waardevolle onderzoek en de input in dit paper. Daarnaast willen de auteurs ook de volgende personen bedanken voor de input aan deze paper: Willem Brantjes, Jordy van den Brink, Fred de Graaf, Dolf ter Horst, Jan Hoogenraad, Martijn de Jong, Martijn Killaars, Joke Knijff, Freddy Velthuizen en Onny de Queljoe.

Literatuurlijst

1. NS. *Energiezuinig rijden (video)*. 1989 [cited 2017 28-8]; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=DGFROfQ4VMM&feature=youtu.be>.
2. Scheepmaker, G.M., *Rijtijdspeling in treindienstregelingen: energiezuinig rijden versus robuustheid*, in *Transport & Planning*. 2013, NS Reizigers/Delft University of Technology (TU Delft): Utrecht, Nederland.
3. Scheepmaker, G.M., R.M.P. Goverde, and L.G. Kroon, *Review of energy-efficient train control and timetabling*. *European Journal of Operational Research*, 2017. **257**(2): p. 355-376.
4. Luijt, R.S., et al., *5 years of Dutch eco-driving: Managing behavioural change*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2017. **98**: p. 46-63.
5. Kroon, L.G., et al., *Stochastic improvement of cyclic railway timetables*. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2008. **42**(6): p. 553-570.
6. NS, *Vervoerplan 2017*. 2016, NS: Utrecht, Nederland.
7. Scheepmaker, G.M. and R.M.P. Goverde, *The interplay between energy-efficient train control and scheduled running time supplements*. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2015. **5**(4): p. 225-239.
8. Jansen Van Galen, M., *Energy-efficient train control in the Netherlands*. 2016, Royal HaskoningDHV/University of Twente: Enschede, Nederland.
9. Deerenberg, M., *Dienstregeling in tienden van minuten*. 2016, ProRail: Utrecht, Nederland.
10. ProRail, *Netverklaring 2017*. 2015: Utrecht, Nederland.
11. Huisman, T., *Programma Noord Nederland*. 2011, ProRail Vervoer & Dienstregeling (VACO): Utrecht, Nederland.
12. Weeda, V.A., *Bandbreedtegrafiek treinserie 5600 oneven*. 2016, ProRail: Utrecht, Nederland.
13. Scheepmaker, G.M. and K.S. Hofstra, *Beschrijving methodiek DINT*. 2017, NS: Utrecht, Nederland.
14. Howlett, P.G. and P.J. Pudney, *Energy-Efficient Train Control*. *Advances in Industrial Control*. 1995, London, United Kingdom: Springer-Verlag.
15. Albrecht, A.R., et al., *The key principles of optimal train control—Part 1: Formulation of the model, strategies of optimal type, evolutionary lines, location of optimal switching points*. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016. **94**: p. 482-508.
16. Albrecht, A.R., et al., *The key principles of optimal train control—Part 2: Existence of an optimal strategy, the local energy minimization principle, uniqueness, computational techniques*. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016. **94**: p. 509-538.

17. Velthuisen, F. and S. Ruijsendaal, *De UZI BASIS methode*. 2011, NS: Utrecht, Nederland.
18. Panou, K., P. Tzieropoulos, and D. Emery, *Railway driver advice systems: Evaluation of methods, tools and systems*. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2013. **3**(4): p. 150-162.
19. Huerlimann, D. *OpenTrack*. 2017 [cited 2017 22-8]; Available from: <http://www.opentrack.ch/>.
20. Radtke, A., *Infrastructure modelling*, in *Railway Timetabling & Operations*, I.A. Hansen and J. Pahl, Editors. 2014, Eurailpress: Hamburg, Duitsland.
21. Albrecht, T., *Energy-Efficient Train Operation*, in *Railway Timetabling & Operations*, I.A. Hansen and J. Pahl, Editors. 2014, Eurailpress: Hamburg, Duitsland. p. 91-116.