

## **Robuust spoor met ERTMS**

Dr. Rob M.P. Goverde  
Technische Universiteit Delft  
[r.m.p.goverde@tudelft.nl](mailto:r.m.p.goverde@tudelft.nl)

**Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk  
22 en 23 november 2012, Amsterdam**

## **Samenvatting**

### *Robuust spoor met ERTMS*

Een systeem is robuust als het blijft presteren bij incorrecte invoer of onder bijzondere condities. Een spoorstelsel is dus robuust als het blijft functioneren bij afwijkende procestijden ten opzichte van de planning, bij afwijkende beschikbaarheid van de infrastructuur, of bij slechte weersomstandigheden. Een betrouwbaar en robuust spoorstelsel kan worden verkregen door enerzijds het voorkomen van afwijkingen en storingen, en anderzijds het beheersen van de gevolgen van afwijkingen en storingen. Een technisch of menselijk systeem zal nooit 100% betrouwbaar zijn en daarom is beheersing van de gevolgen van een storing essentieel. Bij een robuust systeem wordt in het ontwerp al rekening gehouden met mogelijke afwijkingen en storingen in de onderliggende processen en componenten.

De robuustheid van een spoorstelsel wordt bepaald door een integrale samenhang van infrastructuurontwerp, dienstregelingsontwerp, verkeersleiding en vervoerdersprocessen. Landelijke invoering van ERTMS kan een verbetering betekenen op veel meer terreinen dan alleen de treinbeveiliging en in het bijzonder biedt het mogelijkheden tot minder storingen aan infrastructuur, lagere capaciteitsbelasting en daarmee robuustere dienstregelingen, betere monitoring en bijstuurmogelijkheden van treinen bij vertragingen en verstoringen, en betere actuele machinisteninformatie in de treinen. Uitgangspunt is daarbij flexibiliteit van de infrastructuur en bijsturing met beslissingsondersteuning om effectief om te gaan met verstoringen. ERTMS Level 2 biedt de noodzakelijke continue tweezijdige datacommunicatie tussen trein en verkeersleiding waarmee een innovatiesprong op het spoor mogelijk wordt.

Een landelijke migratie naar ERTMS biedt mogelijkheden tot innovatie, maar deze moeten nog wel vertaald worden naar een duurzame visie waarbij ERTMS het uitgangspunt vormt in plaats van de huidige beveiliging. Met name is een nieuwe visie nodig op robuust infrastructuurontwerp en een verkeersleiding die optimaal gebruik maakt van de geavanceerde communicatiemogelijkheden die met name ERTMS Level 2 biedt. Deze bijdrage geeft een voorzet tot een dergelijke visie die moet leiden tot een robuust spoorstelsel. Een wisselstoring leidt dan niet meer tot chaos op het hele spoor en bij verwachte slechte weersomstandigheden kunnen treinen gewoon blijven doorrijden zonder preventief aangepaste dienstregelingen met gehalveerde treindiensten.

## **1. Inleiding**

Het Nederlandse spoornetwerk is één van de meest intensief benutte netwerken in de wereld. Door een strakke planning worden op diverse corridors zelfs een capaciteitsbenutting gerealiseerd die boven de internationaal geadviseerde normen (UIC, 2004) uitsteekt. Daarbij hanteert de grootste vervoerder NS ook een strakke materieel- en personeelsplanning met complexe omlopen. De keerzijde hiervan is dat bij een storing het spoorstelsel al snel niet meer beheersbaar blijkt te zijn. Een sein- of wisselstoring van een uur zorgt niet alleen voor vertragingen en treinuitval tijdens dat uur, maar ook in nog vele uren daarna en bovendien over een groot gebied ver verwijderd van de plek van de oorspronkelijke storing. Bij verwachting van slechte weersomstandigheden sturen ProRail en NS steeds meer preventief bij: als voor de volgende dag slechte weersomstandigheden worden verwacht dan wordt de dienstregeling in grote delen van het land alvast aangepast met typische maatregelen als het halveren van de frequentie van een groot aantal treindiensten. De organisatie van de planning en bijsturing is niet in staat om een dergelijke maatregel dynamisch gedurende de dag door te voeren. Als de slechte weersomstandigheden uitblijven worden de reizigers als haringen in een ton vervoerd in gehalveerde diensten en met lange wachttijden, terwijl daar geen enkele reden meer voor is. Andersom is het ook voorgekomen dat de weerman weinig sneeuw verwachtte en werd besloten om de gewone dienstregeling aan te houden; de volgende middag viel er toch wat sneeuw en het hele spoorstelsel lag plat.

Een robuust spoorstelsel moet tegen een stootje kunnen. Het Nederlandse spoorstelsel is momenteel dus duidelijk niet robuust te noemen. Tegelijkertijd zijn er plannen om het aantal treinen in de brede Randstad nog eens flink te verhogen in het Programma Hoogfrequent Spoor (PHS). Om dit te realiseren is een betrouwbaar spoorstelsel een vereiste.

Een andere actuele ontwikkeling is het strategische besluit van de minister van I&M, Melanie Schultz van Haegen, om het 'beveiligingssysteem' ERTMS (European Rail Traffic Management System) landelijk in te voeren in navolging van de aanbeveling van de Tijdelijke commissie onderhoud en innovatie op het spoor (de Commissie Kuiken) (Tweede Kamer, 2012), gebaseerd op het rapport van de TU Delft (Goverde e.a., 2012). Landelijke invoering van ERTMS kan een verbetering betekenen op veel meer terreinen dan alleen de treinbeveiliging en in het bijzonder biedt het mogelijkheden om tot een robuust spoorstelsel te komen. Deze bijdrage geeft hiervan een overzicht.

Deze bijdrage is als volgt opgebouwd. Allereerst wordt kritisch gekeken naar de term robuustheid en de relatie met betrouwbaarheid in paragraaf 2. Vervolgens wordt in paragraaf 3 ERTMS voorgesteld. Paragraaf 4 gaat in op de innovaties die de invoering van ERTMS geven ten opzichte van het huidige spoorstelsel en die leiden tot een robuuster spoorstelsel. Paragraaf 5 eindigt de bijdrage met conclusies.

## **2. Betrouwbaarheid en robuustheid**

Een systeem is betrouwbaar als de geplande functies uitgevoerd kunnen worden wanneer dat nodig is binnen bepaalde condities (waarvoor het systeem is ontworpen). Daarentegen is een systeem robuust als het blijft presteren bij incorrecte invoer of onder

bijzondere condities. De functie van een spoorstelsel is het vervoeren van personen en goederen middels treindiensten, waarbij de planning is bevat in een dienstregeling. Onder 'normale' omstandigheden moeten de treinen alle reizigers of goederen stipt kunnen vervoeren. Een robuust spoorstelsel blijft ook functioneren als de dienstregeling niet helemaal conflictvrij is, de beschikbaarheid van de infrastructuur afwijkt van de planning, de procestijden afwijken van de planning, of bij slechte weersomstandigheden. In de volksmond is het spoorstelsel betrouwbaar als de reis volgens planning verloopt, d.w.z. dat treinen niet worden opgeheven, treinen niet te vroeg weggrijden, aansluitingen worden gehaald, en uiteindelijk de aankomsttijd op de bestemming punctueel is. In de praktijk is hier dus een robuust systeem voor nodig.

Een betrouwbaar en robuust spoorstelsel kan worden verkregen door geïntegreerde maatregelen op twee vlakken:

- Voorkomen van afwijkingen en storingen,
- Beheersen van de gevolgen van afwijkingen en storingen.

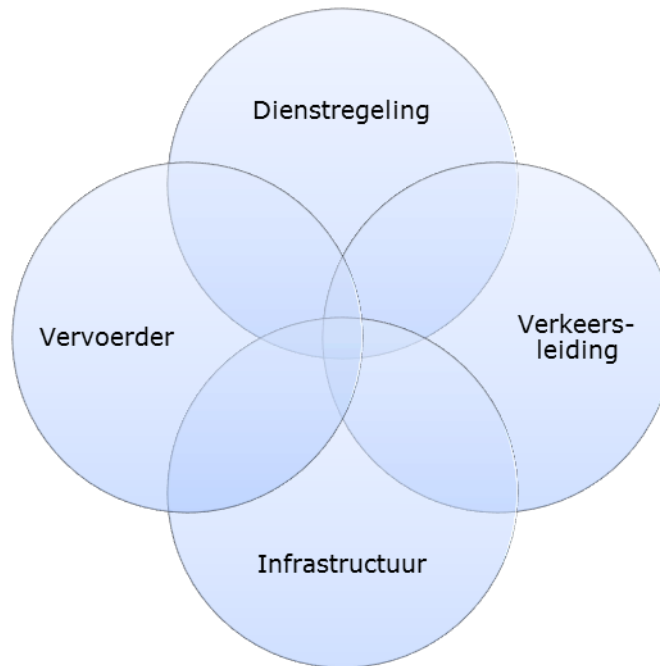
Een technisch systeem zal nooit 100% betrouwbaar zijn en daarom is beheersing van de gevolgen van een storing essentieel voor een robuust systeem. Bij een robuust systeem wordt in het ontwerp al rekening gehouden met mogelijke afwijkingen en storingen in de onderliggende processen en componenten. Een betrouwbaar systeem moet robuust zijn tegen regelmatig voorkomende afwijkingen en storingen. De prestaties kunnen in een verstoorde situatie dan wel tijdelijk licht dalen maar het functioneren van het systeem als geheel mag niet in gevaar komen. In een spoorstelsel betekent dit dat een kleine groep reizigers iets vertraagd op hun bestemming aan kan komen, afhankelijk van de aard van de storing.

Neem als voorbeeld een wisselstoring: als een dergelijke storing nauwelijks voorkomt (zeg eens per tien jaar is er ergens een wisselstoring) dan is een mate van vertragingen onvermijdbaar en toelaatbaar voor een groep reizigers wiens trein direct te maken krijgt met een onverwachte wisselstoring. Als iedere dag wel ergens een wisselstoring is dan hoort dat bij de normale gang van zaken en moet het spoorstelsel als geheel daar tegen kunnen zonder verstoord te raken, bijvoorbeeld door beschikbaarheid van een alternatieve rijweg om de storende wissel heen.

Het ontwerp van systemen en componenten bepaalt in hoge mate of een storing een versturende werking heeft op het integrale systeem. Een storing in de stroomvoorziening van een verkeersleidingspost zal grote versturende gevolgen hebben op het treinverkeer in een groot gebied. In dat geval moet het ontwerp gericht zijn op het voorkomen van de storing door redundante uitvoering van componenten van de stroomvoorziening of een noodstroomvoeding zodat het treinverkeer helemaal niets merkt van een storing. In dit geval is er geen andere oplossing mogelijk omdat een grootschalige stroomstoring niet is op te vangen door een ander subsysteem.

Een spoorstelsel bestaat uit diverse deelsystemen die gezamenlijk robuust moeten zijn. Sommige componenten kunnen daarbij uiterst betrouwbaar (en robuust) worden uitgevoerd terwijl andere componenten bij falen deels opgevangen kunnen worden door

andere componenten. Een spoorstelsel kan worden onderverdeeld in de volgende componenten (zie Figuur 1):



**Figuur 1 Onderdelen van een spoorstelsel**

- **Infrastructuur:** sporenplan, wissels, seinen, spoor, baangebonden beveiligingssysteem, stroomvoorziening, ICT
- **Vervoerders:** treinen, rijproces, halteproces, vertrekprocedure, materieelinzet, logistiek van materieel- en personeelsomlopen
- **Dienstregeling:** geplande aankomst- en vertrektijden, treinpaden, rijwegen, aansluitingen
- **Verkeersleiding:** rijweginstelling, railverkeersmanagement (bijsturing), storingsmanagement (grote verstoringen).

De dienstregeling bepaalt het aanbod van treindiensten voor reizigers en verladers en de kwaliteit daarvan in termen van beloofde reistijd, wachttijd, frequentie en noodzaak van overstappen. De railverkeersleiding bewaakt de afwijkingen van de dienstregeling die ontstaan door afwijkende treinbewegingen (machinistgedrag, weersinvloeden, langere halteertijden, materieelstoring) en mindere beschikbaarheid van de infrastructuur (sein- en wisselstoringen, tijdelijke snelheidsbeperkingen) en stuurt bij met het oog op de punctualiteit, betrouwbaarheid en doorstroming. De infrastructuur inclusief beveiliging geeft randvoorwaarden voor de dienstregeling, railverkeersleiding, en snelheidssturing door machinisten. Een betrouwbare dienstuitvoering vergt een robuuste coördinatie van alle vier onderdelen waarbij falen in één component ook gecompenseerd kan worden in een andere component en met name door de verkeersleiding.

De dienstregeling moet zo goed mogelijk bij de marktwensen passen om een kwalitatief hoog openbaar vervoer te bieden. Als marktwensen kortere reistijden of hogere frequenties vereisen moet dat in de dienstregeling gerealiseerd worden onder de randvoorwaarden van de infrastructuur en bijstuurbaarheid (reserves). Laten deze

randvoorwaarden een gewenste verbetering van de dienstregeling en uitvoering niet meer toe dan moeten òf concessies gedaan worden, zoals stoptreinen die altemeerend een halte overslaan of intercity's die langzamer gaan rijden en extra haltes gaan aandoen, òf de randvoorwaarden worden aangepast zodat het gewenste effect wordt verkregen. Extra infrastructuur bouwen is duur waardoor steeds meer oplossingen worden gezocht in beter benutten van de infrastructuur. De infrastructuurbenutting wordt in hoge mate beïnvloed door het toegepaste seinstelsel en het gedrag van de automatische treinbeïnvloeding zodat hier mogelijkheden voor capaciteitsverhoging liggen zonder dure nieuwbouw van extra sporen dat als laatste mogelijkheid voor capaciteitsverhoging geldt. In het bijzonder is een verschuiving waar te nemen van intelligentie in de infrastructuur naar intelligentie in de treinen.

### **3. ERTMS**

ERTMS biedt een modern cabinesignalerings- en treinbeïnvloedingssysteem waarbij seinen langs de baan overbodig worden en de boordapparatuur in de trein op de hoogte is van hoe ver de trein mag doorrijden en waar snelheidsrestricties op de gegeven rijweg zijn. De boordapparatuur berekent en bewaakt een gedetailleerd dynamisch snelheidsprofiel met remcurves, geeft de machinist gedetailleerde informatie hierover en grijpt zo nodig in als de machinist boven het berekende snelheidsprofiel uitkomt en niet reageert op de waarschuwingen. Met ERTMS zijn stoptonendsein (STS) passages daarom verleden tijd, kan iedere snelheid nauwkeurig bewaakt worden, en hoeft pas op het allerlaatste moment geremd worden afhankelijk van de actuele snelheid en de individuele materieelremkarakteristieken. Dit geldt voor alle ERTMS Levels.

Verschillende levels geven aan hoe de baan-trein communicatie verloopt. Bij ERTMS Level 1 gaat de veiligheidscommunicatie puntsgewijs van baan naar trein via Eurobalises die tussen het spoor liggen. Bij ERTMS Level 2 gaat de communicatie continu via GSM-R radio met een gecentraliseerd RBC (Radio Block Centre) dat in verbinding staat met de rijwegbeveiliging (interlocking). De GSM-R veiligheidscommunicatie is tweezijdig zodat de trein ook veilig de treinpositie- en snelheid aan de RBC door kan geven. Spoorvrijdetectie is onder ERTMS Level 1 en 2 nog steeds nodig zodat de interlocking zeker weet dat spoorsecties vrij of bezet zijn. De reden hiervoor is dat niet gegarandeerd is dat een trein volledig is, oftewel dat een treinstel of wagon is achter gebleven op een spoorsectie. Als deze integriteitscheck wel failsafe in de trein kan worden uitgevoerd dan zou de positie van de gehele lengte van de trein ook via het RBC kunnen worden doorgegeven waarmee spoorvrijdetectie in de baan niet meer nodig is. Dit concept staat bekend als ERTMS Level 3. Hiervoor zijn echter nog een aantal technische hobbels te overwinnen, zoals hoe garandeer je dat iedere trein na (even) uitvallen van de GSM-R communicatie zich weer succesvol heeft aangemeld bij het RBC en hoe ga je om met een trein die zich niet meer aanmeldt maar dus wel ergens op het spoor staat? ERTMS Level 3 is momenteel dus nog niet beschikbaar.

De capaciteitsbenutting verbetert door toepassing van ERTMS (alle levels) door de cabinesignalering met remcurvebewaking en snelheidsbewaking van alle snelheden. Bij ERTMS Level 2 ontstaan nog extra verbeteringen door de continue ontvangstmogelijkheid van nieuwe rijtoestemmingen. De capaciteitsverhoging ten opzichte van het huidige

Nederlandse NS'54 seinstelsel met ATB (Automatische Treinbeïnvloeding) ontstaat door een combinatie van functionaliteiten:

- Effectief uitgesteld remmen met materieelspecifieke remcurves zodat treinen zo lang mogelijk met de hoogst toelaatbare snelheid door kunnen rijden met rijtijd- en opvolgtijdwinsten
- Kortere blokken, mogelijk omdat remafstanden onder ERTMS onafhankelijk zijn van blokgrenzen, waardoor een snellere opvolging mogelijk is en daarmee ook kortere minimum opvolgtijden
- Effectieve inhalingen door de korte minimum opvolgtijden
- Hogere baanvaksnelheden in combinatie met inhalingen op de juiste plekken
- Een stabiele doorstroming bij vertragingen door korte opvolgtijden vanwege korte blokken en kortere remwegen bij lagere snelheid
- Flexibele projectiemogelijkheden van blokken onder ETCS L2 tot zelfs vlak voor een wissel doordat de waarneembaarheid van baanseinen vervalt door de cabinesignalering
- Bewaking van snelheidsstappen die onder ATB-EG (en vv) niet bewaakt kunnen worden (met name alle snelheden tussen 80 km/u en 130 km/u).

De tweezijdige real-time communicatie tussen treinen en verkeersleiding via de RBC's biedt daarboven nog extra mogelijkheden zoals actuele dienstregelingsinformatie en snelheidsadvies aan de machinist en effectief railverkeersmanagement doordat de actuele posities en snelheden van alle treinen nauwkeurig bekend zijn. Onder ERTMS Level 2 kan de trein ook zelf via het RBC rijwegen aanvragen wanneer dat nodig is en kunnen rijwegen veilig worden ingetrokken via de tweeweg communicatie waardoor meer flexibiliteit onderstaat en de treinen volwaardige 'agenten' worden die communiceren via het verkeersmanagement. Voor een gedetailleerd overzicht van ERTMS en de mogelijkheden ervan, zie Goverde e.a. (2012).

#### **4. Robuustheid met ERTMS**

##### *4.1 Robuuste infrastructuur*

De infrastructuur bestaat uit een groot aantal (technische) elementen die bij storing verstorend op het treinverkeer kunnen werken. In Nederland vallen momenteel onder regelmatig storende elementen: seinen, spoorvrijdetectie en wissels. De bestaande implementatie van deze elementen zijn gebaseerd op het NS'54 lichtseinstelsel en de ATB-EG treinbeïnvloeding. ERTMS heeft invloed op de manier waarop deze elementen worden geïmplementeerd en/of gebruikt.

Onder ERTMS zijn lichtseinen langs de baan niet meer nodig aangezien ERTMS werkt met cabinesignalering. Storingen aan deze seinen zijn met ERTMS dus verleden tijd. Daarnaast vervallen onder ERTMS de strenge eisen aan de plaatsing van baanseinen m.b.t. waarneembaarheid en onderlinge afstand, zodat de projectering van blokgrenzen stukken eenvoudiger kan en significante capaciteitswinsten gehaald kunnen worden. Een andere verstorende factor gerelateerd aan lichtseinen in combinatie met ATB-EG zijn de stoptonend sein (STS) passages, die ATB-EG (en ATB-vv) niet kan voorkomen. Naast veiligheidsaspecten heeft een STS-passage een verstorende werking op het treinverkeer.

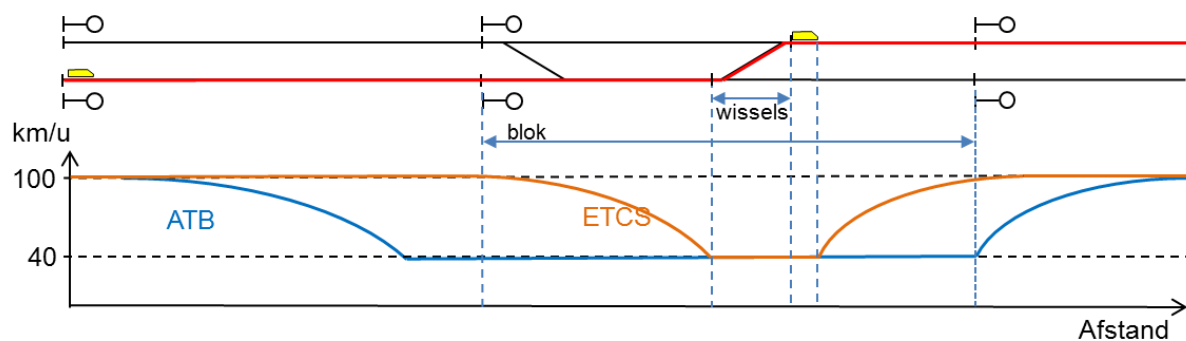
Als een trein door een rood sein heeft gereden mag de machinist niet meer doorrijden en volgt een onderzoek naar het incident. Volgens de Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT, 2012) waren er 155 STS-passages in 2011. In 85% van de gevallen blijft het gevolg beperkt tot vertragingen, in 10% van de gevallen raakt de infrastructuur (zoals wissels) beschadigd, en in de overige 5% ontstaan gevaarlijke situaties zoals een botsing, ontsporing of komt de trein op een open overweg terecht (ILT, 2012). In 40% van de STS-passages bereikt de trein een gevaarpunt als een wissel of overweg (ILT, 2012). ETCS maakt gebruik van remcurvebewaking waardoor een trein altijd vóór het einde van de rijtoestemming tot stilstand zal komen. STS-passages en de verstorende gevolgen op de treindienst zijn dan dus verleden tijd.

Onder ERTMS (op Level 3 na) is nog steeds spoorvrijdetectie in de baan nodig waarmee de interlockings bepalen of een rijweg vrij is en ingesteld kan worden. Onder ERTMS maakt het echter niet uit wat voor soort spoorvrijdetectie wordt gebruikt en in het bijzonder kunnen assentellers gebruikt worden. Assentellers hebben een hogere betrouwbaarheid en beschikbaarheid (in termen van storingsfrequentie), zijn onderhoudsruimer, en minder gevoelig voor weersomstandigheden (regen, bladeren, sneeuw) dan spoorstroomlopen (Theeg en Vlasenko, 2009). Assentellers zijn bovendien flexibel te plaatsen met minder eisen aan de bovenbouw en zijn goedkoper. Assentellers vormen daarmee een robuust alternatief voor spoorstroomlopen die onder ATB-EG essentieel zijn. ATB-EG maakt namelijk gebruik van gecodeerde spoorstroomlopen: behalve voor spoorvrijdetectie worden de spoorstroomlopen ook gebruikt voor communicatie van ATB-codes naar de trein. Ook het zogenaamde roestrijden is met assentellers verleden tijd: alle sporen en wissels die zijn voorzien van spoorstroomlopen moeten tenminste één keer per 24 uur worden bereden door minimaal 20 assen omdat anders de betrouwbare werking door mogelijke roestvorming niet meer kan worden gegarandeerd. Hiervoor worden meestal reguliere treinen ingezet. Men spreekt over roestrijden als een trein hiertoe een afwijkende route over een emplacement krijgt. Assentellers worden in steeds meer landen gebruikt i.p.v. spoorstroomlopen. In Duitsland worden sinds 1995 uitsluitend assentellers gebruikt voor alle nieuwe infrastructuur en vervanging (Theeg en Vlasenko, 2009).

Wissels zijn een essentieel onderdeel van de infrastructuur en maken flexibel infrastructuurgebruik mogelijk. Behalve voor de reguliere dienstregeling zijn wissels ook een belangrijk instrument voor de planning van onderhoudswerkzaamheden en de bijsturing bij storingen aan de infrastructuur. Wissels kunnen door de bijsturing worden gebruikt voor alternatieve rijwegen op emplacementen, deels enkelspoor rijden op meersporige baanvakken bij een partiële baanvakstremming, en keren bij een volledige stremming. Wissels kunnen daarbij het verschil maken tussen een volledige en partiële stremming of zelfs helemaal geen stremming. In de gebogen stand moeten wissels echter met een lagere snelheid bereden worden, waarbij die snelheid afhangt van het type wissel (hoe hoger de snelheid des te groter en duurer het wissel). Onder het bestaande NS'54 seinstelsel met ATB-EG kunnen hierdoor forse rijtijdverliezen ontstaan omdat ver vantevoren al moet worden afgeremd. Wissels zorgen ook voor extra restricties bij de plaatsing van seinen. Onder ERTMS zijn wissels echter makkelijk inpasbaar en leiden alleen tot lokale snelheidsrestricties.



Figuur 2 geeft een voorbeeld van de impact van een wissel dat met maximaal 40 km/u bereiden mag worden in de rijweg van een trein. Onder NS'54/ATB-EG mag een trein het blok waarin het wissel ligt met maximaal 40 km/u inrijden. Dit betekent dat de trein al twee seinen voor het wissel de opdracht krijgt af te remmen tot 40 km/u (geel) zodat de trein het blok met maximaal 40 km/u kan inrijden. Onder ERTMS werkt dit anders. Een ERTMS trein krijgt naast de rijtoestemming die aangeeft over welke afstand de trein mag doorrijden ook een spoorbeschrijving die aangeeft welke snelheden de trein over die hele afstand mag rijden. De trein berekent dan zelf op basis van de treinkarakteristieken het bijbehorende dynamische snelheidsprofiel waarbij de trein pas vlak voor het wissel 40 km/u hoeft te hebben bereikt en weer direct kan optrekken als de hele trein de wissels is gepasseerd. Onder ERTMS kunnen treinen dus langer met hogere snelheid doorrijden waardoor (overloop)wissels ook effectiever gebruikt kunnen worden voor tijdelijk enkelsporig rijden bij werkzaamheden en partiële stremmingen bij meersporige lijnen.



**Figuur 2 Snelheidsrestrictie door wissel bij ATB en ETCS**

#### 4.2 Robuuste dienstregelingen

Een robuuste dienstregeling moet kleine vertragingen kunnen opvangen. Hier is de uitdaging om de juiste hoeveelheid speling toe te passen in de rij- en halteertijden en de buffertijden tussen treinpaden optimaal te verdelen, waarbij een balans gevonden moet worden tussen capaciteitsbenutting en stabiliteit. Robuuste dienstregelingen ontstaan door expliciet rekening te houden met de variatie in procestijden en interactie van de processen. Met ERTMS gaat de capaciteitsbenutting omlaag waardoor meer ruimte komt voor buffertijden waarmee de stabiliteit en robuustheid van de dienstregeling toeneemt.

ERTMS Level 2 levert nauwkeurige meetgegevens van treinposities en -snelheden die door de treinen naar het RBC worden gestuurd, inclusief berichten dat een trein stilstaat waaruit rij- en halteertijden nauwkeurig kunnen worden afgeleid, inclusief ongeplande stops op baanvakken doordat een trein moet wachten op een voorgaande trein. Analyse van deze gegevens levert een schat aan informatie over variatie in rij- en halteertijden, en secundaire vertragingen bij ongeplande stops. Deze realisatiegegevens kunnen worden teruggekoppeld naar het ontwerp van dienstregelingen om betrouwbare rij-, opvolg- en buffertijden te bepalen. Dit soort analyses kan volledig geautomatiseerd worden (Daamen e.a., 2009; Goverde en Meng, 2011; Kecman en Goverde, 2012).

Onder ERTMS kunnen rijtijden korter worden door snelheidsverhoging op drie niveaus: 1) treinen kunnen langer doorrijden met hogere snelheid door treinspecifiek uitgesteld remmen voor snelheidsbeperkingen; 2) er kan met hogere baanvaksnelheden gereden worden als het spooralignment dat toe staat wat met name gunstig is voor lange-

afstandstreinen (IC's en internationale treinen); en 3) verlaging van toegelaten baanvaknelheden naar de grove snelheidsstappen die ATB-EG bewaakt (40, 60, 80, 130, 140 km/u) is niet meer nodig vanwege snelheidsbewaking van alle snelheden. De hogere snelheden kunnen enerzijds verzilverd worden door kortere rijtijden in de dienstregeling of anderzijds door meer speling in de rijtijden zonder dat rijtijden langer worden. In het laatste geval kan de extra speling ingezet worden voor energiezuinig rijden en bij vertragingen om de vertraging sneller in te halen.

Onder ERTMS kunnen opvolgtijden en overkruistijden tot meer dan 50% korter worden (Goverde e.a., 2012). Dit komt door elkaar aanvullende karakteristieken: de kortere toenaderingstijd door de trein- en snelheidsafhankelijke remcurve, kortere blokken mogelijk gemaakt door een flexibelere projectering van blokgrenzen (met virtuele seinen) waardoor een trein sneller een blok weer vrij maakt, en op emplacementen het langer kunnen doorrijden op hogere snelheid vanwege het dynamische snelheidsprofiel in een blok. Hierdoor kunnen treinen elkaar sneller volgen waardoor ook de minimum halteertijden bij inhalingen en overstapaansluitingen korter kunnen zijn.

De kortere minimum opvolgtijden en rijtijden zorgen voor een lagere baanvakbelasting. Voor corridors waar zonder ERTMS de baanvakbelasting te hoog is leidt dit tot een stabielere afwikkeling van het treinverkeer. In het andere geval kan de overcapaciteit worden ingevuld door verhoging van de frequentie, de baanvaknelheid, de heterogeniteit (intercity's harder laten rijden) of de stabiliteit met energiezuinig rijden als er geen vertragingen zijn.

#### *4.3 Robuuste dienstuitvoering*

Grotere vertragingen kunnen niet meer effectief door de dienstregeling worden opgevangen en moeten worden aangepakt met real-time railverkeersmanagement om vertragingen zo snel mogelijk af te bouwen en volgvertragingen te minimaliseren. Met name voor corridors met hoogfrequent treinverkeer hebben afwijkingen van het plan grote versturende gevolgen zodat een goede real-time monitoring en railverkeersmanagement essentieel is. Met ERTMS Level 2 worden de posities en snelheden van de treinen continu gemonitord waardoor toenemende vertragingen snel kunnen worden gedetecteerd en proactief ingegrepen kan worden. Stopmeldingen op locaties anders dan perronsporen geven ongeplande stops aan die duiden op problemen met de trein of conflicterende rijwegen waardoor een trein moest stoppen. Voor de monitoring is dit essentiële informatie waardoor locatiespecifiek en direct actie kan worden ondernomen zonder dat een machinist contact hoeft op te nemen met een treindienstleider. Aanpassingen aan de dienstregeling door de verkeersleiding kunnen onder ERTMS Level 2 ook direct aan de betrokken treinen worden doorgegeven zodat op de trein altijd de actuele dienstregeling aanwezig is waar de laatste wijzigingen in verwerkt is.

Doordat in de railverkeersleidingsposten veel nauwkeurigere informatie binnenkomt inclusief snelheden van treinen kan de verkeersleiding (incl. treindienstleiders) worden ondersteund met applicaties voor het voorspellen van conflicten in spoorgebruik, reizigersaansluitingen en geplande logistieke relaties. Vervolgens kunnen ook effectieve en realiseerbare bijsturingsmaatregelen worden berekend, zoals het veranderen van een treinvolgorde, verkorten of verlengen van rij- of halteertijden, en instellen van

alternatieve rijwegen. De machinisten worden automatisch geïnformeerd over de laatst doorgevoerde maatregelen met bijvoorbeeld nieuwe doeltijden op specifieke punten of (energiezuinige) snelheidsadviezen, en kunnen daar vervolgens rekening mee houden.

Aan de TU Delft zijn modellen en algoritmen ontwikkeld voor real-time conflictdetectie en conflictoplossing. Conflictdetectie is gebaseerd op online rijtijdvoorspellingen en een railverkeersmodel dat conflicterende rijwegen en stationsrelaties detecteert. De conflictoplossing berekent de optimale combinatie van bijsturingmaatregelen voor het oplossen van de gedetecteerde conflicten en eventuele volgconflicten die tijdens het oplossingsalgoritme ontstaan. Oplossingsmaatregelen bestaan uit het aanpassen van vertrektijden, omdraaien van de volgorde van treinen bij wisselstraten, aanpassen van inhalingen, herrouteren van treinen op stationsemplacementen, en snelheidsadviezen (*retiming, reordering, rerouting, speed advise*). De tool ROMA is ontwikkeld voor real-time verkeersmanagement van één of meer treindienstleidingsgebieden en bestaat uit een efficiënt microscopisch model en algoritmen voor conflictdetectie en -oplossing met als doelfunctie het minimaliseren van de maximale volgvertraging ten opzichte van de dienstregeling (D'Ariano, 2008; Corman, 2010). Daarnaast is een macroscopisch model in ontwikkeling dat een up-to-date landelijke dienstregeling bijhoudt met betrekking tot treinvertragingen en beschikbaarheid van de infrastructuur inclusief tijdelijke snelheidsbeperkingen. Het model voorspelt verwachte conflicten in infrastructuurgebruik, overstappen en logistiek, en berekent optimale aanpassingen aan de dienstregeling als de conflicten niet meer effectief lokaal opgelost kunnen worden (met bijvoorbeeld ROMA), waarbij de impact van de aanpassingen (verbreken/vasthouden van aansluitingen, volgordeveranderingen bij vertrek van stations) op netwerkniveau worden doorgerekend (Kecman e.a., 2012). De samenhang tussen het macroscopische landelijke model en het microscopische lokale model volgt de hiërarchische structuur van een landelijke en lokale verkeersleiding.

Een belangrijke voorwaarde voor de online inzet van deze railverkeersmanagement-systemen is een koppeling met online gegevensstromen van actuele treinposities en treinsnelheden. Treinposities zijn op verkeersleidingsposten beschikbaar via het TROTS treinummersvolg-systeem, maar treinsnelheden zijn met NS'54/ATB-EG nog niet beschikbaar. ERTMS biedt in één klap alle benodigde gegevens en de communicatiemogelijkheden tussen trein en verkeersleidingspost om de ontwikkelde prototypes daadwerkelijk in te zetten. Dit geeft verkeersleiders de nodige beslissingsondersteuning voor het actueel en robuust houden van de landelijke dienstregeling, en treindienstleiders beslissingsondersteuning voor het actueel en conflictvrij houden van het procesplan rijwegen, ook op 'complexe' infrastructuur.

Ook bij versperringen biedt ERTMS extra mogelijkheden zoals achteruitrijden zonder dat de machinist van cabine hoeft te wisselen en het snel doorgeven van nieuwe plannen aan de machinisten. Ook reparatie van storingsen en onderhoud kunnen flexibeler en met kortere buitendienststellingen door mobiele werkplekbeveiliging met Handheld Terminals.

## **5. Conclusies**

Met ERTMS kan naast de veiligheid ook de robuustheid van het integrale spoorstelsel verbeterd worden. Storingsgevoelige infrastructuurelementen die bij het huidige

seinstelsel en ATB nodig zijn (baanseinen, spoorstroomlopen) zijn onder ERTMS niet meer nodig (baanseinen) of kunnen anders worden uitgevoerd met robuustere technieken (assentellers). Rijtijden worden korter door een combinatie van uitgesteld remmen, hogere baanvaksnelheid en bewaking van alle snelheidsgrenzen. Opvolgtijden worden ook korter door kortere treinspecifieke toenaderingstijden, hogere snelheden, en kortere blokken. Als gevolg van de kortere rij- en opvolgtijden neemt de baanvakbelasting af en kunnen ook snelle inhalingen worden uitgevoerd met korte halteertijd voor de ingehaalde trein. Hierdoor kunnen robuustere dienstregelingen worden ontworpen met voldoende toeslagen en buffertijd, die (bij ERTMS Level 2) kunnen worden gevalideerd met (automatische) analyses van uiterst nauwkeurige realisatiegegevens (posities, snelheden, stopmeldingen) verstuurd vanuit de treinen.

Onder ERTMS Level 2 geven treinen continu hun positie en snelheid door aan de railverkeersleiding wat geavanceerd verkeersmanagement mogelijk maakt. Toename van vertragingen wordt continu gemonitord en ongeplande stops worden gemeld met stopmeldingen vanuit de trein, waarmee railverkeersleiding anticiperend kan optreden. Aangepaste dienstregelingen kunnen naar de treinen worden gestuurd zodat machinisten over de actuele dienstregeling beschikken en daarop kunnen anticiperen. De continue tweezijdige communicatie tussen trein en verkeersleiding bij ERTMS Level 2 kan ook effectief gebruikt worden voor geavanceerd real-time railverkeersmanagement zoals conflictdetectie en –oplossing op lokaal en landelijk niveau, en snelheidsadvisering aan treinen voor het voorkomen van conflicten en energiezuinig rijden.

ERTMS maakt dus een innovatiesprong mogelijk op het gebied van infrastructuur, dienstregelingsontwerp, verkeersleiding en machinistinformatie. Dit moet zich nog vertalen naar een duurzame visie waarbij ERTMS het uitgangspunt vormt in plaats van de huidige beveiliging. Wegsaneren van wissels en inhaal mogelijkheden onder het mom van 'robuust spoor' zijn contraproductief en verminderen de bijstuur mogelijkheden en infrastructuurcapaciteit in de toekomst. Ook moet bij ProRail Verkeersleiding nog een innovatieslag gemaakt worden hoe om te gaan met de betere informatie van treinen en de communicatiemogelijkheden van actuele machinisteninformatie naar de trein. De landelijke migratie naar ERTMS kan gebruikt worden om een geweldige stap voorwaarts te maken naar een robuust en efficiënt spoorstelsel maar dan moet er wel een integrale visie komen over de toekomstige inkleding van het spoorstelsel onder ERTMS, zodat de naam Rail Traffic Management volledig tot zijn recht komt.

## **Referenties**

Corman, F. (2010). *Real-time Railway Traffic Management: Dispatching in complex, large and busy railway networks*. Proefschrift, Technische Universiteit Delft, Delft.

Daamen, W., Goverde, R.M.P., Hansen, I.A. (2009). Non-Discriminatory Automatic Registration of Knock-On Train Delays. *Networks and Spatial Economics*, 9(1), 47-61.

D'Ariano, A. (2008). *Improving Real-Time Train Dispatching: Models, Algorithms and Applications*. Proefschrift, Technische Universiteit Delft, Delft.

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

Goverde, R.M.P., Meng, L. (2011). Advanced monitoring and management information of railway operations. *Journal of Rail Transport Planning and Management*, 1(2), 69-79.

Kecman, P., Corman, F., D'Ariano, A., Goverde, R.M.P. (2012). Rescheduling models for network-wide railway traffic management. *Proceedings of the Conference on Advanced Systems for Public Transport (CASPT12)*, Santiago, July 23-27, 2012.

Kecman, P., Goverde, R.M.P. (2012). Process mining of train describer event data and automatic conflict identification. In: C.A. Brebbia, N. Tomii, J.M. Mera (red.), *Computers in Railways XIII, WIT Transactions on The Built Environment*, 127.

ILT (2012). *STS-passages 2011: Analyse en resultaten over de periode 2007-2011*. Rapport met kenmerk ILT-2012/14980, Inspectie Leefomgeving en Transport, Den Haag, 18 juni 2012.

Theeg, G., Vlasenko, S. (red.) (2009). *Railway Signalling & Interlocking*. Eurailpress, Hamburg.

Tweede Kamer (2012). *Parlementair onderzoek onderhoud en innovatie spoor: Nr. 9 Rapport*. Tweede Kamer der Staten Generaal, Kamerstuk 32707-9, Den Haag.

UIC (2004). UIC Code 406: Capacity. UIC, Parijs, 1 september 2004.